

ZESZYTY NAUKOWE TOWARZYSTWA DOKTORANTÓW
UNIwersYTETU JAGIELLOŃSKIEGO

RADA NAUKOWA „ZESZYTÓW NAUKOWYCH TOWARZYSTWA DOKTORANTÓW UJ”

Przewodniczący Rady Naukowej

Prof. dr hab. Wojciech Nowak | Rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego

Dr Denys Azarov | Uniwersytet Narodowy „Akademia Kijowsko-Mohylańska”

Prof. Martin Bier | East California University

Prof. dr hab. Andriy Boyko | Lwowski Uniwersytet Narodowy im. Iwana Franki

Prof. Hugh J. Byrne | FOCAS Research Institute, Dublin Institute of Technology

Dr hab. Adrián Fábíán | University of Pécs

Prof. dr hab. Maria Flis | Uniwersytet Jagielloński

Prof. dr hab. Tadeusz Gadacz | Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie

Dr Herbert Jacobson | Linköping Universitet

Prof. dr hab. Katarzyna Kieć-Kononowicz | Uniwersytet Jagielloński

Dr Miklós Kiss | University of Groningen

Dr Erdenhuluu Khohchahar | Kyoto University

Prof. dr hab. Andrzej Kotarba | Uniwersytet Jagielloński

Dr Oleksiy Kresin | Narodowa Akademia Nauk Ukrainy

Prof. dr hab. Marta Kudelska | Uniwersytet Jagielloński

Prof. dr hab. Tomasz Mach | Uniwersytet Jagielloński

Prof. dr hab. Andrzej Mania | Uniwersytet Jagielloński

Dr Kristin McGee | University of Groningen

Prof. dr hab. Karol Musioł | Uniwersytet Jagielloński

Prof. Biderakere E. Rangaswamy | Bapuji Institute of Engineering and Technology

Dr Melanie Schiller | University of Groningen

Prof. dr hab. Jacek Składzień | Uniwersytet Jagielloński

Prof. dr hab. Leszek Sosnowski | Uniwersytet Jagielloński

Prof. dr hab. Bogdan Szlachta | Uniwersytet Jagielloński

Prof. Luigia di Terlizzi | Università degli Studi di Bari Aldo Moro

Prof. Matthias Theodor Vogt | Institut für kulturelle Infrastruktur Sachsen

ZESZYTY NAUKOWE TOWARZYSTWA DOKTORANTÓW
UNIwersYTETU JAGIELLOŃSKIEGO

NAUKI ŚCISŁE
~ NUMER 15 (2/2017) ~



KRAKÓW 2017

Zeszyty Naukowe Towarzystwa Doktorantów UJ
ul. Czapskich 4/14, 31-110 Kraków
www.doktoranci.uj.edu.pl/zeszyty

Redaktor naczelna:
Ewa Modzelewska

Zastępczyni redaktor naczelnej:
Iga Łomanowska

Sekretarz redakcji:
Rafał Kur

Redaktor prowadząca serii:
Agnieszka Proszewska

Numer czasopisma finansowany ze środków Towarzystwa Doktorantów UJ

Współpraca wydawnicza:

WYDAWNICTWO
nowa strona

www.wydawnictwonowastrona.pl
e-mail: biuro@nowastrona.net.pl

© Copyright by Zeszyty Naukowe Towarzystwa Doktorantów UJ
All rights reserved
Wydanie I, Kraków 2017
Nakład: 60 egz.

e-ISSN 2082-3827
p-ISSN 2084-977X

Spis treści

ADRIAN STENCEL, AGNIESZKA PROSZEWSKA	7
Dlaczego w biologii tak trudno być „rewolucjonistą”?	
PAWEŁ KUBIAK, JACEK LEŚNIKOWSKI	15
Wpływ obciążenia rozciągającego na tłumienie wybranych tekstylnych linii transmisyjnych	
PAWEŁ LEŚNIEWICZ	31
Stanowisko badawcze do wizualizacji przepływu powietrza wokół izolowanego koła samochodowego	
ANNA LASKA-LEŚNIEWICZ	39
Wykorzystanie metod szybkiego prototypowania (<i>rapid prototyping</i>) w nowoczesnej medycynie	
INFORMACJE O AUTORACH	49

Contents

ADRIAN STENCEL, AGNIESZKA PROSZEWSKA	7
Why Is It So Hard to Be a “Revolutionist” in Biology??	
PAWEŁ KUBIAK, JACEK LEŚNIKOWSKI	15
The Impact of the Tensile Load to the Attenuation of Selected Textile Transmission Lines	
PAWEŁ LEŚNIEWICZ	31
Test Stand to Visualize the Air Flow Around the Isolated Vehicle Wheel	
ANNA LASKA-LEŚNIEWICZ	39
Rapid Prototyping Methods in Modern Medicine	
ABOUT THE CONTRIBUTORS	49

ADRIAN STENCEL

UNIwersytet Jagielloński
Wydział Filozoficzny
E-MAIL: ADSTENCEL@GMAIL.COM

AGNIESZKA PROSZEWSKA

UNIwersytet Jagielloński
Wydział Filozoficzny
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
E-MAIL: AGNIESZKA.PROSZEWSKA@GMAIL.COM

Dlaczego w biologii tak trudno być „rewolucjonistą”?

STRESZCZENIE

Zrozumienie tego, w jaki sposób tworzy się i rozwija wiedza naukowa, jest bardzo złożonym problemem. W myśl popularnego poglądu, rozpowszechnionego między innymi przez Thomasa Kuhna, co jakiś czas nauka przechodzi okresy tak zwanych rewolucji – diametralnych zmian w pojmowaniu otaczającej nas rzeczywistości, które zmieniają sposób widzenia świata. Taka wizja rozwoju wiedzy jest szczególnie widoczna w historii fizyki. Ciekawym zagadnieniem wydaje się próba odpowiedzi na pytanie, czy podobne przełomy mają miejsce także w innych naukach, w tym w naukach biologicznych. Celem tego artykułu jest wykazanie, że występujące w nauce rewolucje na gruncie biologii mogą mieć specyficzny, lokalny charakter i dotyczyć tylko niektórych jej działów. Hipoteza ta zostanie omówiona na przykładzie analizy wpływu mikrobiomiki na koncepcję organizmu.

SŁOWA KLUCZOWE

mikrobiomika, filozofia nauki, filozofia biologii, rewolucje naukowe

Wprowadzenie

Jednym z najciekawszych zagadnień w filozofii nauki jest próba zrozumienia, w jaki sposób rozwija się nasza wiedza o naukach przyrodniczych. Czy mamy do czynienia z jej akumulacją, która systematycznie prowadzi do

powiększania „gmachu ludzkiej wiedzy” aż do momentu, w którym pełen obraz świata będzie kompletny? A może nauki przyrodnicze przeżywają co jakiś czas coś na kształt rewolucji, które burzą starą wizję, na zgłiszczach tworząc nowy, całkiem inny obraz otaczającej nas rzeczywistości? Próba odpowiedzi na pytanie, który z tych dwóch scenariuszy wydaje się opisywać postęp wiedzy naukowej w sposób najbardziej adekwatny, podzieliła naukowców – zarówno biologów, jak i filozofów.

Przez długi czas w historii nauki (przynajmniej od XVI wieku) panowało przekonanie, że postęp w ramach nauk przyrodniczych ma charakter właśnie kumulatywny, a naukowcy, korzystając z metod eksperymentu oraz dedukcji, systematycznie przybliżają nas do ostatecznego, *prawdziwego* opisu świata. Z każdym następnym odkryciem świat staje się nam bliższy, a jego zjawiska coraz mniej tajemnicze. Wkrótce filozoficzno-metodologiczna analiza burzliwego rozwoju fizyki pokazała jednak, że obraz ten jest niecałkiem adekwatny – konsekwencją pojawienia się teorii względności nie było bowiem zwykłe poszerzenie naszej wiedzy o świecie. Jej wprowadzenie zmusiło naukowców również do odrzucenia pewnych idei, stanowiących fundament obrazu ówczesnego świata, jak na przykład absolutny czas i przestrzeń czy istnienie wyróżnionego układu odniesienia (jak zakładała klasyczna mechanika Newtona). Analiza poszczególnych odkryć oraz ich wpływu na rozwój nauki pozwoliła w końcu na zmianę sposobu myślenia o zjawisku postępu i przejście od podejścia kumulatywnego do rewolucyjnego. Proces ten został najszerzej opisany przez Thomasa Kuhna (1962).

We względu na fakt, iż znaczącą część filozoficznych analiz zjawiska rewolucji w nauce przeprowadzono w kontekście fizyki, wkrótce zaczęto zastanawiać się nad zakresem stosowności tego modelu. Czy rewolucje naukowe są głównie domeną fizyki, czy może poszukiwać można ich także na innych polach naukowych dociekań, jak biologia, geologia czy chemia? Zdaniem części badaczy, o ile w kontekście nauk biologicznych daje się wyróżnić epizody, które ewidentnie rewolucję przypominają¹, o tyle kwestia ich zasięgu i powszechności budzi już spore wątpliwości. Analizujący praktykę badawczą biologów filozofowie chętnie skłaniają się zatem ku scenariuszom alternatywnym, opowiadając się na przykład za wspomnianą już kumulatywną wizją wiedzy biologicznej².

¹ Zob. A. S. Wilkins, *Are There Kuhnian Revolutions in Biology?*, „Bioessays” 1996, No. 18, s. 695–696.

² Zob. P. Godfrey-Smith, *Is it a Revolution?*, „Biology and Philosophy” 2007, No. 22, s. 429–437.

Celem niniejszego artykułu jest wykazanie, że o ile na gruncie nauk biologicznych rzeczywiście zgodzić się można na mówienie o rewolucjach na wzór tych występujących w naukach ścisłych, to jednak dodatkowej refleksji wymaga często dość specyficzny charakter tych zjawisk. Rewolucje w biologii mogą nie mieć bowiem – typowego dla dotychczasowych analiz takich nauk jak fizyka – charakteru globalnego, lecz mogą charakteryzować się *lokalnością* (dotykać tylko niektórych jej subdyscyplin)³. Analizując aktualną praktykę badawczą, argumentujemy, że właśnie taki „lokalny” wpływ na biologię ma tak zwana rewolucja mikrobiomiczna, która – jak wielu badaczy sugerowało⁴ – rewolucjonizuje nasze rozumienie organizmów.

Dlaczego mikrobiomika zdaje się rewolucjonizować rozumienie organizmów na gruncie biologii?

Mikrobiomika (*microbiomics*) to dyscyplina zajmująca się badaniem symbiotycznych mikroorganizmów, czyli wszystkich tych stworzeń, które zamieszkują skórę czy tkanki zwierząt i roślin⁵. Ostatnimi czasy prowadzone w jej ramach badania zaczęły wywierać na biologię coraz większy wpływ, wydają się bowiem podważać nasze rozumienie tego, czym jest organizm. Fakt ten komentuje między innymi M. McFall-Ngai, pisząc: „Te nowe informacje domagają się ponownego zbadania i reewaluacji podstaw takich koncepcji, jak genom, populacja, środowisko czy organizm”⁶. Jak uzasadnić tak daleko idące stwierdzenie?

Jeśli przyjrzymy się uważnie otaczającym nas roślinom i zwierzętom, zauważymy, iż każde z nich stanowi pewną funkcjonalną całość, przystosowaną do radzenia sobie z różnymi warunkami środowiskowymi. Posiadają układ nerwowy, umożliwiający lokalizację pożywienia, układ mięśniowy, ułatwiający jego chwytanie, a także układ pokarmowy, aby zdobyty pokarm

³ A. Stencel, A. Proszewska, *How Research on Microbiomes Is Changing Biology: A Discussion on the Concept of the Organism*, Foundations of Science, Springer Netherlands 2017, [online] <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10699-017-9543-x.pdf>

⁴ R. Sleator, *The Human Superorganism – Of Microbes and Men*, “Medical Hypotheses” 2010, No. 74 (2), s. 214–215.

⁵ L. Mazmanian et al., *An Immunomodulatory Molecule of Symbiotic Bacteria Directs Maturation of the Host Immune System*, “Cell” 2005, No. 122 (1), s. 107–118; G. Clarke et al., *Minireview: Gut microbiota: the neglected endocrine organ*, “Molecular Endocrinology” 2014, No. 28 (8), s. 1221–1238.

⁶ M. McFall-Ngai et al., *Animals in a Bacterial World, a New Imperative for the Life Sciences*, “Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 2013, No. 110 (9), s. 3229–3236 (tłum. A. Proszewska).

strawić, a następnie zasymilować niezbędne składniki odżywcze, zapewniając przetrwanie. Pełnienie tak wielu różnych funkcji umożliwia im budowa – każde z nich składa się z milionów komórek, specjalizujących się w wypełnianiu poszczególnych zadań. Komórki te nie są jednak zbiorowiskiem losowym, ale efektem podziału zygoty (zapłodnionej komórki). Nic więc dziwnego, że często mówi się o organizmie jako funkcjonalnej całości, stanowiącej efekt podziałów i dywersyfikacji zygoty w wielokomórkowy twór, jak ujął to na przykład Jonathan Slack: „rozwój objawia się w sposób najbardziej jaskrawy w procesie rozwoju embrionalnego, gdy zapłodnione jajo rozwija się w złożony organizm”⁷.

Pojawia się zatem pytanie: czy mikrobiomika podważa tę dość powszechną definicję organizmu? Liczne odkrycia mikrobiologii pokazały w końcu, że wiele funkcji organizmu nie jest pełnionych przez komórki pochodzące z zygoty, jak przypuszczano, ale przez symbiotyczne mikroorganizmy pobierane ze środowiska. Ostatnie badania pokazują między innymi, że prawidłowe funkcjonowanie układu immunologicznego zwierząt jest możliwe tylko wówczas, jeśli organizmy te mają kontakt z odpowiednimi mikroorganizmami⁸. Podobnie uwarunkowane jest również działanie układu pokarmowego niektórych gatunków⁹. Prawidłowe funkcjonowanie zwierząt i roślin możliwe jest wyłącznie wtedy, gdy nabędą one odpowiedni zestaw mikroorganizmów, pełniących funkcje, które jeszcze kilka lat temu przypisywaliśmy komórkom pochodzącym z zygoty. Nie powinno zatem dziwić, iż niektórzy badacze, na przykład R. Sleator, sugerują, że odkrycia mikrobiomiki w pewnym sensie podważają fundamenty, na których spoczywa tradycyjna koncepcja organizmu:

Przez lata nasze tradycyjne spojrzenie na „ja” ograniczało się do naszych własnych ciał, złożonych z komórek eukariotycznych zakodowanych przez genom. Jednak w dobie technologii mikrobiologicznych i biologii systemów pogląd ten przekroczył w końcu tradycyjne ograniczenia naszej własnej, wewnętrznej istoty, obejmując również lokalne symbiotyczne mikroorganizmy¹⁰.

Śledząc najnowsze odkrycia mikrobiomiki, wydaje się, że uzasadnione jest mówienie o zjawisku biologicznej rewolucji w kontekście definicji i rozumienia tego, czym jest organizm. Czy tak jest w istocie?

⁷ J. Slack, *Essential Developmental Biology* (2nd ed.), Oxford 2005 (tłum. A. Proszewska).

⁸ L. Mazmanian et al., op. cit.

⁹ G. Clarke et al., op. cit.

¹⁰ R. Sleator, op. cit. (tłum. A. Proszewska).

Dlaczego trudno mówić o globalnej, mikrobiomicznej rewolucji?

Aby mówić o rewolucji w odniesieniu do tego, czym jest organizm, musiałaby istnieć jedna, uniwersalna koncepcja, wspólna dla wszystkich biologicznych subdyscyplin, która mogłaby owej rewolucji podlegać. Z dotychczasowej dyskusji rzeczywiście wyłania się taki obraz: organizmy to pewne funkcjonalne obiekty, powstające z zapłodnionej komórki. Niestety, biolodzy dalecy są od takiej jednomyślności. Ponieważ w ramach praktyki badawczej korzysta się z wielu alternatywnych koncepcji organizmu¹¹, może zaistnieć sytuacja, iż odkrycia mikrobiomiki, rewolucyjne dla jednych, dla innych mogą okazać się zupełnie niegroźne. Dlaczego?

Biologia jako gałąź nauki jest bardzo złożonym i skomplikowanym działem nauk przyrodniczych. Pomimo powszechnej zgodności biologów co do przedmiotu badań – świata ożywionego, sposób jego badania może różnić się między poszczególnymi dyscyplinami dość znacząco. Paleontolog w terenie zachowa się inaczej niż biolog eksperymentalny: ten pierwszy skupi się na analizie kości, sprawdzając, jak do siebie pasują, a także czy należą do gatunków już znanych, czy może do nowego, właśnie odkrytego; biolog eksperymentalny natomiast zajmie się na przykład badaniem tego, w jaki sposób dany organizm rozwija się z zapłodnionej komórki, analizując uczestniczące w tym procesie białka albo określając warunki zewnętrzne, jakie muszą być spełnione, by oko kręgowca prawidłowo się rozwinęło. Nietrudno się zatem domyślić, że stosowane przez nich metody będą różne: pierwszy skupi się na komparatystycznych, drugi na różnego rodzaju biochemicznych sposobach badania świata ożywionego.

Biolodzy badają świat na różne sposoby i w związku z tym inaczej też definiują podstawowe dla swojej dyscypliny pojęcia, co – jak pokazuje analiza filozoficzna¹² – dotyczy również koncepcji tak fundamentalnych, jak idea organizmu. Nie powinno to jednak dziwić. Badacz kości będzie stosował inne wyznaczniki organizmalności niż biolog analizujący na przykład zachowania społeczne kotów. Obserwacja ta już zdaje się sugerować, dlaczego twierdzenie, jakoby mikrobiomika powodowała lokalne rewolucje w biologii, wydaje się zasadne – ponieważ dla pewnych celów badawczych

¹¹ J. Pepper, M. Herron, *Does Biology Need an Organism Concept?*, “Biological Reviews” 2008, No. 83 (4), s. 621–627; L. Clarke, *The Problem of Biological Individuality*, “Biological Theory” 2010, No. 5 (4), s. 312–325; A. Stencel, A. Proszewska, *W poszukiwaniu uniwersalnej koncepcji organizmu. Problem indywidualizacji*, “Filozofia Nauki” 2017, nr 4 (100), s. 115–128.

¹² J. Pepper, M. Herron, op. cit.; L. Clarke, op. cit.

biolodzy mogą definiować organizmy na bardziej konkretnych założeniach. Niektóre idee mogą opierać się na podstawach wystarczająco ogólnych, które będą w stanie wchłonąć wszelkie odkrycia mikrobiomiki, inne zaś będą musiały zostać odrzucone, kiedy ich fundamentalne i bardzo konkretne założenia ulegną falsyfikacji w toku rozwoju nauki.

W naszej ostatniej pracy¹³ wykazaliśmy, że tak w istocie jest – koncepcje bazujące na bardzo wąskich i konkretnych założeniach nie są w stanie poradzić sobie z odkryciami mikrobiomiki, natomiast koncepcjom opierającym się na bardzo szerokich fundamentach mikrobiomika nie powinna sprawić większych problemów. Do pierwszego typu zalicza się koncepcje podobne do tej, o której pisaliśmy w poprzednim podrozdziale, tj. utożsamiającej organizm ze zbiorem funkcjonalnie powiązanych komórek, powstałych w wyniku podziałów i dywersyfikacji zygoty. W ramach takiego podejścia organizmy definiowane są poprzez odwołanie się do pewnych cech fenotypowych, wszelkie nowe informacje na temat fenotypów mogą zatem sprawić, że koncepcje te staną się nieadekwatne. Do drugiego typu zalicza się na ogół koncepcje bazujące na terminach o wyższym stopniu abstrakcji, czyli takie, których podstawy nie zależą od obserwacji konkretnych cech fenotypowych. W takim przypadku wzrost naszej wiedzy na temat fenotypów nie sprawi, że koncepcje te staną się nagle nieadekwatne. Dowiemy się raczej, że istnieje wiele fenotypowych sposobów, dzięki którym może się realizować organizmalność. Do takich definicji zaliczyć można na przykład ideę organizmu zaproponowaną przez Quellera i Strassmann¹⁴, która identyfikuje organizmy jako obiekty cechujące się wysokim stopniem współpracy oraz niskim stopniem konfliktu pomiędzy poszczególnymi elementami. W przypadku tej koncepcji wykazaliśmy, że mikrobiomika nie podważa jej trafności.

Z powyższej analizy wyłania się odpowiedź na pytanie, dlaczego tak trudno być w biologii „rewolucjonistą” (przynajmniej w kwestii rozumienia idei organizmu). Aby można było stwierdzić, że biologia przechodzi prawdziwą rewolucję o charakterze globalnym, musiałby istnieć pewien wspólny dla całej biologii fundament, który nowe odkrycia mikrobiomiki miałyby podważyć. Niestety, w przypadku współczesnych koncepcji organizmu sytuacja jest znacznie bardziej złożona. Nie istnieje jedna, uniwersalna idea, wspólna dla wszystkich subdyscyplin. Co więcej, zdaje się, że mamy raczej do czynienia ze zjawiskiem przeciwnym – różne gałęzie biologii stosują różne

¹³ A. Stencel, A. Proszewska, *How Research on Microbiomes Is Changing Biology...*, op. cit.

¹⁴ D. Queller, J. Strassmann, *Beyond Society: the Evolution of Organismality*, "Philosophical Transactions of the Royal Society B" 2009, B364, s. 3143–3155.

koncepcje organizmu: jedne bardziej konkretne, inne bardziej abstrakcyjne. Koncepcje te różnie „reagują” zatem na odkrycia mikrobiomiki i mimo że badania nad symbiotycznymi mikroorganizmami podważają fundamenty niektórych z nich, sama „rewolucja mikrobiomiczna” ma raczej charakter lokalny – tylko niektóre subdyscypliny muszą ponownie zbadać i reewaluować sposób, w jaki definiują organizmy.

Wnioski

Celem tego krótkiego tekstu było pokazanie, że rewolucje występujące w biologii mogą cechować się specyficzną dla tej dziedziny lokalnością. Wynika to z faktu, że biolodzy, ze względu na mnogość celów i praktyk badawczych, dopuszczają różne definicje tego samego pojęcia. Nie znaczy to oczywiście, że wszelki postęp w biologii ma z konieczności charakter lokalny. Argumentujemy, że biologia jako nauka jest bardzo złożoną i skomplikowaną dyscypliną, w której spotkać możemy rewolucje zarówno lokalne, jak i globalne¹⁵, dotyczące wszystkich działów biologii w ten sam sposób. Analizując przykłady z praktyki badawczej, formułujemy konkluzję, iż być może nie powinniśmy poszukiwać jednej, uniwersalnej miary postępu w biologii, akceptując wizję rozwoju, który może się odbywać na wiele różnych sposobów.

WHY IS IT SO HARD TO BE A „REVOLUTIONIST” IN BIOLOGY?

ABSTRACT

Understanding how science is created and developed is a very complex problem. Many claim that once in a while the science goes through periods of so-called “revolutions” – diametric changes in the perception of the reality, that change the way we see the world. Such a vision of the development of knowledge is particularly evident in the history of physics. Do similar breakthroughs take place in other sciences, such as biology or chemistry, as well? Our main objective is to demonstrate that the scientific revolutions in biology can have a specific, local, character and concern only some particular branches of biology. This hypothesis will be discussed by analyzing the impact of microbiomics on the concept of the organism.

KEYWORDS

microbiomics, philosophy of science, philosophy of biology, scientific revolutions

¹⁵ A. S. Wilkins, op. cit.

BIBLIOGRAFIA

1. Clarke L., *The Problem of Biological Individuality*, "Biological Theory" 2010, No. 5 (4), s. 312–325.
2. Clarke G. et al., *Minireview: Gut microbiota: the neglected endocrine organ*, "Molecular Endocrinology" 2014, No. 28 (8), s. 1221–1238.
3. Godfrey-Smith P., *Is it a Revolution?*, "Biology and Philosophy" 2007, No. 22, s. 429–437.
4. Kuhn T., *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago 1962.
5. Pepper J., Herron M., *Does Biology Need an Organism Concept?*, "Biological Reviews" 2008, No. 83 (4), s. 621–627.
6. Mazmanian L. et al., *An Immunomodulatory Molecule of Symbiotic Bacteria Directs Maturation of the Host Immune System*, "Cell" 2005, No. 122 (1), s. 107–118.
7. McFall-Ngai M. et al., *Animals in a Bacterial World, a New Imperative for the Life Sciences*, "Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America" 2013, No. 110 (9), s. 3229–3236.
8. Slack J., *Essential Developmental Biology* (2nd ed.), Oxford 2005.
9. Stencel A., Proszewska A., *How Research on Microbiomes Is Changing Biology: A Discussion on the Concept of the Organism*, Foundations of Science, Springer Netherlands 2017, [online] <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10699-017-9543-x.pdf>
10. Stencel A., Proszewska A., *W poszukiwaniu uniwersalnej koncepcji organizmu. Problem indywidualizacji*, „Filozofia Nauki” 2017, nr 4 (100), s. 115–128.
11. Sleator R., *The Human Superorganism – Of Microbes and Men*, "Medical Hypotheses" 2010, No. 74 (2), s. 214–215.
12. Queller D., Strassmann J., *Beyond Society: the Evolution of Organismality*, "Philosophical Transactions of the Royal Society B" 2009, B364, s. 3143–3155.
13. Wilkins A. S., *Are There Kuhnian Revolutions in Biology?*, "Bioessays" 1996, No. 18, s. 695–696.

PAWEŁ KUBIAK

POLITECHNIKA ŁÓDZKA
WYDZIAŁ TECHNOLOGII MATERIAŁOWYCH I WZORNICTWA TEKSTYLIÓW
INSTYTUT ARCHITEKTURY TEKSTYLIÓW
ZAKŁAD ODZIEŻOWNICTWA I TEKSTRONIKI
E-MAIL: PAWEŁ.KUBIAK@DOKT.P.LODZ.PL

JACEK LEŚNIKOWSKI

POLITECHNIKA ŁÓDZKA
WYDZIAŁ TECHNOLOGII MATERIAŁOWYCH I WZORNICTWA TEKSTYLIÓW
INSTYTUT ARCHITEKTURY TEKSTYLIÓW
ZAKŁAD ODZIEŻOWNICTWA I TEKSTRONIKI

Wpływ obciążenia rozciągającego na tłumienie wybranych tekstylnych linii transmisyjnych

STRESZCZENIE

Artykuł porusza zagadnienia związane z pomiarami i analizą wpływu naprężeń mechanicznych powstających przy rozciąganiu tekstylnych linii transmisyjnych, umieszczonych na płaskich wyrobach włókienniczych, na ich zdolności przesyłowe. Tekstylne linie transmisyjne, zbudowane z elektroprzewodzących materiałów tekstylnych umieszczonych na podłożach włókienniczych, przeznaczone są do przesyłania sygnałów elektrycznych. Opisane badania obejmują pomiary parametru S_{21} w szerokim zakresie częstotliwości sięgającym 5 GHz. Parametr ten odzwierciedla stopień tłumienia sygnału elektrycznego przechodzącego przez testowaną linię. W artykule przedstawiono wpływ działania długotrwałych naprężeń mechanicznych na parametr S_{21} trzech przykładowych linii transmisyjnych przed cyklem rozciągania i po nim.

SŁOWA KLUCZOWE

linie transmisyjne, przesyłanie sygnałów, linie sygnałowe, tekstronika, naprężenia mechaniczne w tekstyliach

Wstęp

Dzisiejsze innowacyjne włókiennictwo pozwala łączyć ze sobą elementy włókiennictwa tradycyjnego z naukami na pierwszy rzut oka niezwiązanymi z tekstyliami, takimi jak elektronika i informatyka, tworząc zupełnie nowe możliwości konstruowanych materiałów. Połączenie takie nazywamy tekstroniką¹. Obejmuje ona również zagadnienia związane z fizjologią, automatyką i metrologią.

Rosnące w dzisiejszych czasach zapotrzebowanie na coraz bardziej nowoczesne wyroby włókiennicze, o możliwościach i zastosowaniach odbiegających od utartych standardów, wzbudza zainteresowanie konsumentów², którzy poszukują najnowocześniejszych rozwiązań technicznych ukrytych w tekstyliach. Następuje ciągły rozwój wiedzy na temat nowoczesnych rozwiązań przemysłu tekstylnego³. Od paru lat powstają nowoczesne systemy tekstroniczne, łączące w sobie elementy włókiennicze, takie jak tekstylia, z elementami elektronicznymi (odpowiadającymi za przetwarzanie sygnału elektrycznego) oraz informatycznymi (przepływ informacji, ich akwizycja i opracowanie). Przykładowym rozwiązaniem tekstronicznym jest strażacki ubiór ratowniczy wyposażony w czujniki temperatury i rytmu pracy serca⁴ lub system do monitorowania stanu zdrowia osób⁵, nadzorujący podstawowe funkcje życiowe (ruch, oddychanie, położenie itp.). Systemy takie mogą być również przeznaczone dla dzieci⁶. Kolejnym ciekawym przykładem jest system tekstroniczny do zastosowań w zawodach wymagających przebywania w ciężkich warunkach środowiskowych, monitorujący temperaturę ciała człowieka⁷. W przypadku prób implementacji elementów tekstronicz-

¹ K. Gniotek, Z. Stempień, J. Zięba, *Tekstronika – nowy obszar wiedzy*, „Przegląd Włókienniczy” 2003, nr 2.

² S. Walczak, *Inteligentne tekstylia – międzynarodowe innowacje w tekstronice*, „Acta Innovations” 2012, nr 3, s. 103–122.

³ G. Bartkowiak, *Kierunki rozwoju odzieży inteligentnej*, „Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka”, 2010.

⁴ G. Owczarek, K. Łęzak, G. Gralewicz, *Koncepcja monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych podczas pracy w odzieży strażackiej*, „Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka” 2007, nr 9.

⁵ E. Skrzetuska, *Trendy rozwojowe w tekstronice – Rozwiązania tekstroniczne dla ochrony zdrowia*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2004, nr 4 (90), s. 34–40.

⁶ A. Jakubas, E. Łada-Tondyry, M. Nowak, M. Margol, A. Lipińska-Opałka, *Koncepcja tekstronicznego systemu do pomiarów funkcji życiowych małych dzieci*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2015, nr 12 (91), s. 121–124.

⁷ A. Bogdan, M. Zwolińska, *Future Trends In the Development of Thermal Manikins Applied for the Design of Clothing Thermal Insulation*, „FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe” 2012, Vol. 20, No. 4 (93), s. 89–95.

nych, w tym również tekstylnych linii przesyłowych, do odzieży, pomimo wielu możliwości, jakie niesie współczesna technika, występują liczne problemy dotyczące ergonomii i wygody stosowania takich rozwiązań, również w aspekcie bezpośredniego kontaktu tych elementów z człowiekiem. Jest to jeden z najważniejszych aspektów, które należy dokładnie zbadać w najbliższej przyszłości⁸.

Jednym z elementów, które mogą znaleźć zastosowanie w rozmaitych systemach tekstronicznych, są tekstylne linie transmisyjne. Elementy te, wykonane z materiałów tekstylnych elektroprowadzących umieszczonych na określonych podłożach włókienniczych, mają za zadanie przesyłać sygnały elektryczne, co jest niezwykle istotne dla prawidłowego i bezpiecznego funkcjonowania systemów tekstronicznych, często budowanych dla ochrony życia i zdrowia człowieka. Właściwości przewodzące tekstylnych linii transmisyjnych zależą od wielu czynników, między innymi od budowy oraz właściwości materiałów użytych do konstrukcji poszczególnych linii. W idealnym przypadku linia transmisyjna o określonej budowie powinna przesyłać zadaną informację z jednego jej końca na drugi bez żadnych strat i błędów w przesyłanym sygnale. W rzeczywistości jednak istnieje szereg czynników zaburzających zdolności transmisyjne takich linii, a ponadto występuje naturalne zjawisko tłumienia sygnału. Właściwości transmisyjne tekstylnej linii sygnałowej mogą również ulegać zmianie pod wpływem jej odkształceń spowodowanych naprężeniem mechanicznym oddziałującym na linię podczas jej normalnego użytkowania. Jedną z ważniejszych wielkości świadczących o zdolnościach przesyłowych linii jest tłumienie przechodzącego przez nią sygnału.

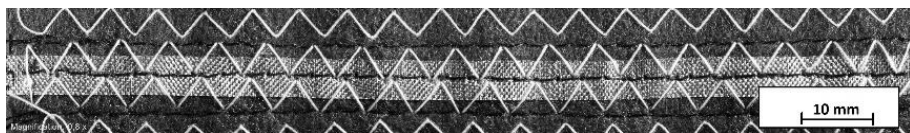
W artykule przedstawiono wartości parametru S_{21} , określającego tłumienie sygnału w linii dla linii poddanej określonej sile rozciągającej. Przytoczono trzy przykładowe linie transmisyjne o różnej budowie, różnych materiałach tekstylnych użytych na ich podłoża oraz różnych splotach tych materiałów. Parametry przyjęte jako stałe to takie same wymiary linii oraz użyty materiał elektroprowadzący, którym jest gotowa tkanina o bardzo dobrych właściwościach elektroprowadzących, po której są przesyłane określone sygnały.

⁸ K. Gniotek, I. Krucińska, *The Basic Problems of Textronics*, "FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe" 2004, Vol. 12, No. 1 (45).

Obiekt badań

Obiektem badań jest podłużna tekstylna linia transmisyjna, której przykład przedstawiono na ryc. 1. Jest to linia z przesyłą pojedynczą warstwą sygnałową po jednej stronie podłoża włókienniczego oraz dwiema przesyłami ścieżkami masy po drugiej stronie podłoża. Badane linie transmisyjne mają 30 cm długości oraz 2,5 cm szerokości. Więcej o budowie i właściwościach linii będącej obiektem badań można znaleźć w literaturze⁹.

(a)



(b)



Ryc.1. Badane linie. Widok od strony ścieżki sygnałowej (a),
widok od strony ścieżek masy (b)

Źródło: J. Leśnikowski, *Modelowanie tekstylnych linii sygnałowych do zastosowań w tekstronice*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej” 2013, nr 1167.

Wybrane parametry struktury i budowy linii przesyłowych, takie jak szerokość ścieżek elektroprowadzących czy odstęp pomiędzy nimi, mają bezpośredni wpływ na zdolności transmisyjne linii. Do wykonania ścieżek elektroprowadzących zastosowano tkaninę Ponge, zbudowaną z przędzy z dodatkiem niklu włoskiej firmy Soliani. Jej podstawowe parametry przedstawiono w tab. 1.

⁹ J. Leśnikowski, *Modelowanie tekstylnych linii sygnałowych do zastosowań w tekstronice*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej” 2013, nr 1167, s. 41–58; idem, *New Kind of Textile Transmission Line with an Impedance of 50 Ohms*, „FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe” 2015, Vol. 23, No. 2 (110), s. 51–54.

Tab. 1. Parametry tkaniny Soliani Ponge

Parametry materiału	jednostka	Tkanina poliestrowa (osnowa i wątek)
Liczność osnowy	nitek/cm	26
Liczność wątku	nitek/cm	18
Dodatek niklu	g/m ²	16
Masa powierzchniowa	g/m ²	60 ± 15
Rezystywność powierzchniowa	Ω ²	0,4
Zakres roboczy	°C	Od -40 do +90

Źródło: Materiały informacyjne firmy Soliani, [online] <http://www.solia-niemc.com/products/shielding-conductive-textile-fabrics/emc-emi-nickel-polyester-fabrics/> [dostęp: 28.12.2016].

Do badań wybrano linie znacząco różniące się parametrami i użytymi surowcami. Jedynie grubości tkanin podłoża dobrano w miarę możliwości takie same. Podstawowe parametry tkanin stanowiących podłoże testowanych linii przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Podstawowe parametry tkanin stanowiących podłoże testowanych linii transmisyjnych

LP.	Surowiec	Splot	Grubość	Masa powierzchniowa	Liczność osnowy	Liczność wątku
			mm	g/m ²	nitek/cm	nitek/cm
1.	wełna	plócienny	0,42	287	24	20
2.	poliamid	panamowy	0,52	211	42	24
3.	poliester	skośny	0,42	183	36	34

Źródło: opracowanie własne.

Stanowisko pomiarowe oraz sposób wykonania pomiarów

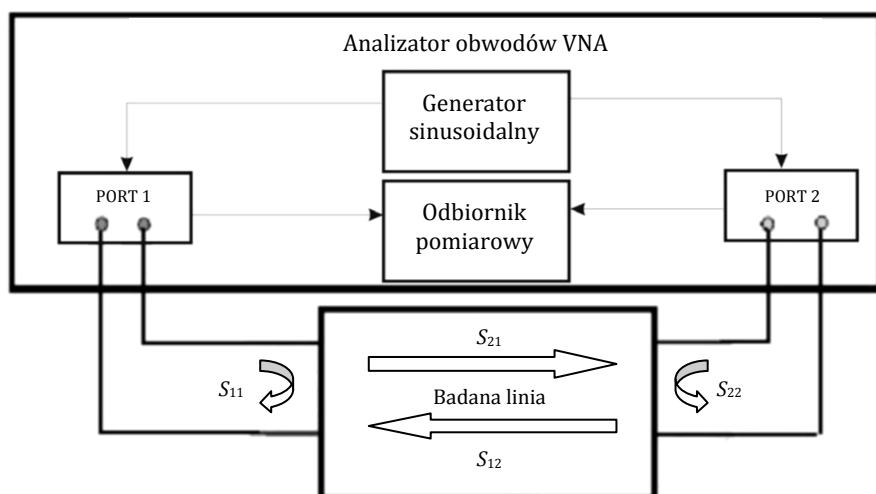
W artykule przedstawiono wybrane wyniki przeprowadzonych pomiarów trzech przykładowych ścieżek badanych w stanie bez obciążenia oraz po cyklu obciążeń. Każdy egzemplarz wykonanej linii transmisyjnej przebadano pięciokrotnie. Wszystkie pomiary wykonywano w pomieszczeniu o ściśle określonych parametrach temperatury i wilgotności. Tekstylnie linie transmisyjne umieszczono w klimacie normalnym, tj. w temperaturze 20°C oraz wilgotności powietrza równej 65%. Wartości temperatury i wilgotności dobrano w oparciu o normy dotyczące pomiarów laboratoryjnych przeprowadzanych na tekstyliach¹⁰. Po aklimatyzacji i ustabilizowaniu się materiału linii sygnałowych badano je w specjalnie przygotowanym stanowisku pomiarowym.

W skład stanowiska pomiarowego, którego schemat przedstawiono na ryc. 2, wchodzi analizator obwodów (Vector Network Analyzer, VNA), składający się z generatora sygnałów sinusoidalnych o szerokim zakresie zmian częstotliwości (od 10 MHz do 5 GHz), dwóch portów wejścia/wyjścia oraz odbiornika pomiarowego sprzężonego pomiędzy tymi portami.

Analizator ten w pierwszej fazie pomiaru podaje na port 1 sygnał sinusoidalny z wewnętrznego generatora o zmiennej, przemiatanej w całym zakresie częstotliwości. Jednocześnie do portu 2 jest dołączony odbiornik mierzący sygnał przechodzący przez testowaną linię transmisyjną. Odbiornik pomiarowy dokonuje również pomiaru sygnału na wejściu testowanej linii dołączonej do portu 1. Z pomiarów tych uzyskuje się zatem dwa parametry, oznaczone odpowiednio jako S_{21} i S_{11} . Pierwszy z nich obrazuje wartość sygnału przechodzącego przez badaną linię w stosunku do sygnału podanego na wejście linii, generowanego przez generator. Uzyskuje się w ten sposób informację o tłumieniu sygnału przechodzącego przez linię. Ponieważ podczas tej fazy pomiaru jednocześnie mierzony jest poziom sygnału odbitego od linii, uzyskuje się kolejny parametr, określony jako S_{11} . Wartość tego parametru świadczy o dopasowaniu linii do pozostałych elementów toru transmitującego sygnały elektryczne. Ma ona wpływ na jakość sygnału transmitowanego testowaną linią. Analizator obwodów w drugiej fazie pomiaru zamienia kierunek przepływu transmitowanego sygnału na odwrotny, to znaczy sygnał przepływa od portu 2, do którego dołączony jest generator sygnałowy, do portu 1. W tej fazie pomiaru uzyskuje się kolejne parametry S , oznaczone jako S_{12} i S_{22} . Parametr S_{12} jest zatem odpowiednikiem para-

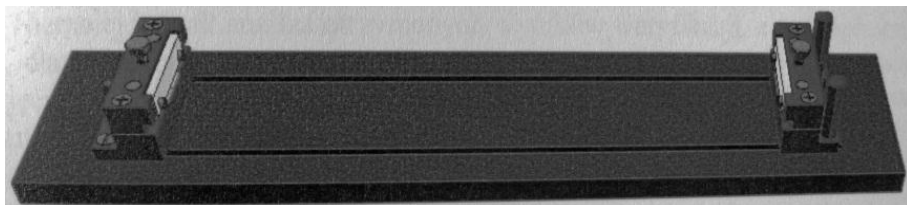
¹⁰ *Wilgotność we włókiennictwie*, [online] <http://wskalski.republika.pl/opisy/wilg.htm> [dostęp: 1.01.2017].

metru S_{21} , który został wyznaczony przy odwrotnym kierunku przepływu sygnału. Podobnie jest z parametrem S_{22} , który jest odpowiednikiem sygnału S_{11} . Wstępne pomiary testowe wymienionych czterech parametrów S dla testowanych linii potwierdziły te zależności. Tak więc przystępując do dalszych badań, założono, że testowana w artykule tekstylna linia sygnałowa ma budowę symetryczną, to znaczy jej zdolności transmisyjne nie zależą od kierunku przepływu transmitowanego sygnału. Dalsze pomiary ograniczono do pomiarów współczynników S_{11} i S_{21} .



Ryc. 2. Schemat stanowiska do pomiarów parametrów tekstylnych linii przesyłowych

Źródło: J. Leśnikowski, *Modelowanie tekstylnych linii sygnałowych do zastosowań w tekstronice*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej” 2013, nr 1167.



Ryc. 3. Zaciski pomiarowe do mocowania tekstylnych linii przesyłowych

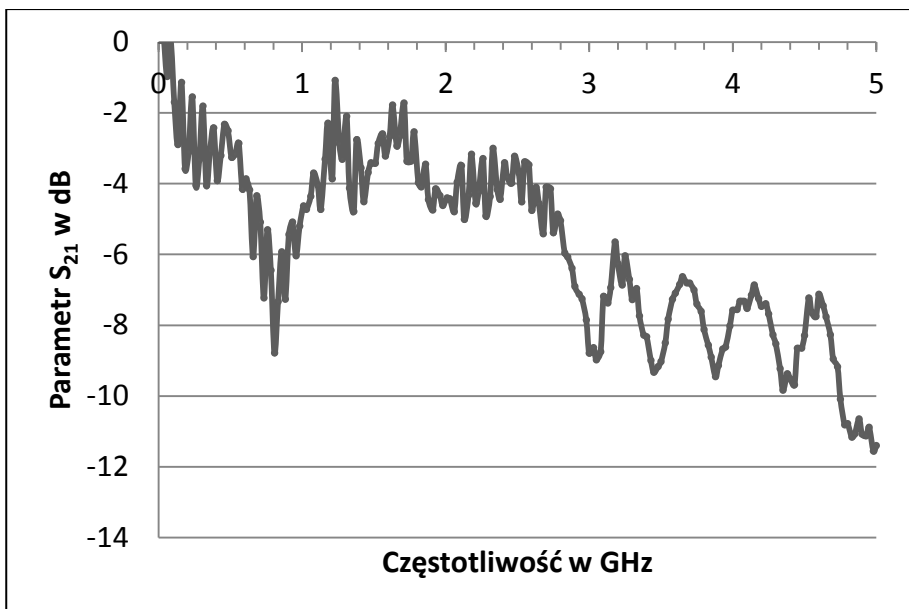
Źródło: J. Leśnikowski, *Modelowanie tekstylnych linii sygnałowych do zastosowań w tekstronice*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej” 2013, nr 1167.

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań dotyczących zjawiska tłumienia linii transmisyjnych. Pomiary wykonano w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 5 GHz. Każdą z wytworzonych tekstylnych linii, po uprzedniej aklimatyzacji w warunkach normalnych, umieszczono w zaciskach pomiarowych (ryc. 3.). Przeprowadzono pięciokrotny pomiar wartości parametrów S w funkcji częstotliwości, bez obciążenia, a wyniki tych pięciu pomiarów uśredniono. Po serii pomiarów bez obciążenia każdą z linii obciążano odważnikiem o wadze 1 kg na czas 1 godziny. Linie zdejmowano, po ponownym umieszczeniu w zaciskach pomiarowych wykonywano serię kolejnych pięciu pomiarów, a następnie uśredniono ich wyniki. Daną linię obciążano ponownie tym samym obciążeniem 1 kg, ale na czas 24 godzin. Po upływie 24 godzin linię umieszczano ponownie w zaciskach pomiarowych i wykonywano serię 5 pomiarów, uśredniając otrzymane wyniki. Postępowanie takie miało umożliwić zbadanie wpływu oddziaływań mechanicznych, które mogą występować podczas normalnego procesu noszenia odzieży, z naniesionymi testowanymi liniami transmisyjnymi, na których mogą się ujawnić długotrwale występujące naprężenia mechaniczne. Mogą one doprowadzić do zmiany charakterystyki tłumienia tekstylnych linii sygnałowych lub nawet spowodować wyraźne pogorszenie i degradację tego parametru, niszcząc taką linię.

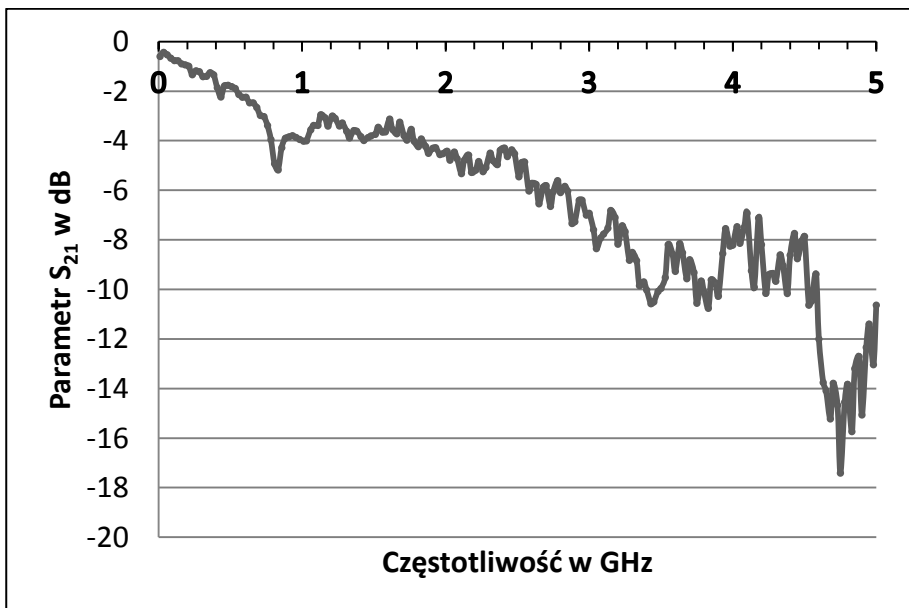
Wyniki i wnioski

Na ryc. 4–9 przedstawiono wyniki pomiarów wartości parametru S_{21} w funkcji częstotliwości dla trzech przykładowych tekstylnych linii transmisyjnych. Podłoża tych linii są wykonane z materiałów tekstylnych, których właściwości przedstawiono w tab. 2. Pomiary te wykonano w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 5 GHz. Prezentowane poniżej wyniki przedstawiają pomiary wykonane zarówno przed obciążeniem linii, jak i po pełnym cyklu obciążenia. Pełen cykl obciążenia oznacza wyniki końcowe dla ścieżek, które przeszły zarówno obciążenie 1 kg na okres 1 godziny, jak i takie samo obciążenie przez okres 24 godzin.

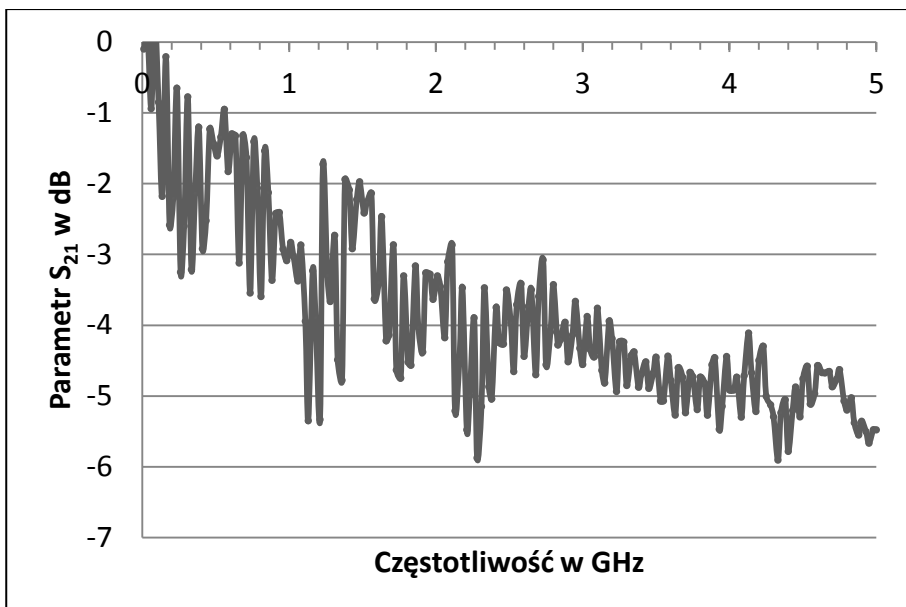
Na ryc. 4 i 5 przedstawiono wyniki parametru S_{21} przed rozciąganiem oraz po całym cyklu rozciągania dla pierwszej linii. Analogicznie wyniki parametru S_{21} dla drugiej badanej linii przedstawiono na ryc. 6 i 7, a dla linii trzeciej na ryc. 8 i 9.



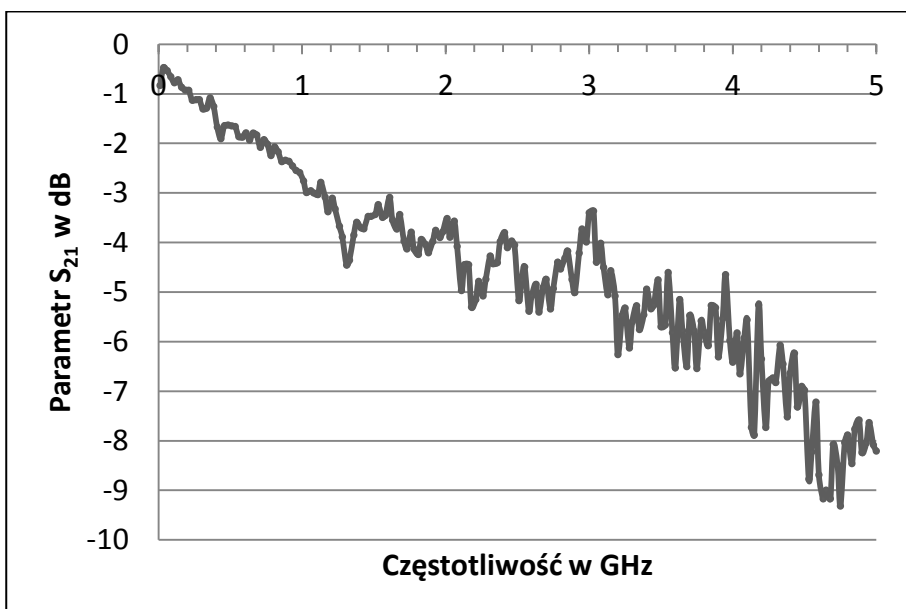
Ryc. 4. Parametr tłumienia S_{21} linii transmisyjnej 1 nieobciążonej
Źródło: opracowanie własne.



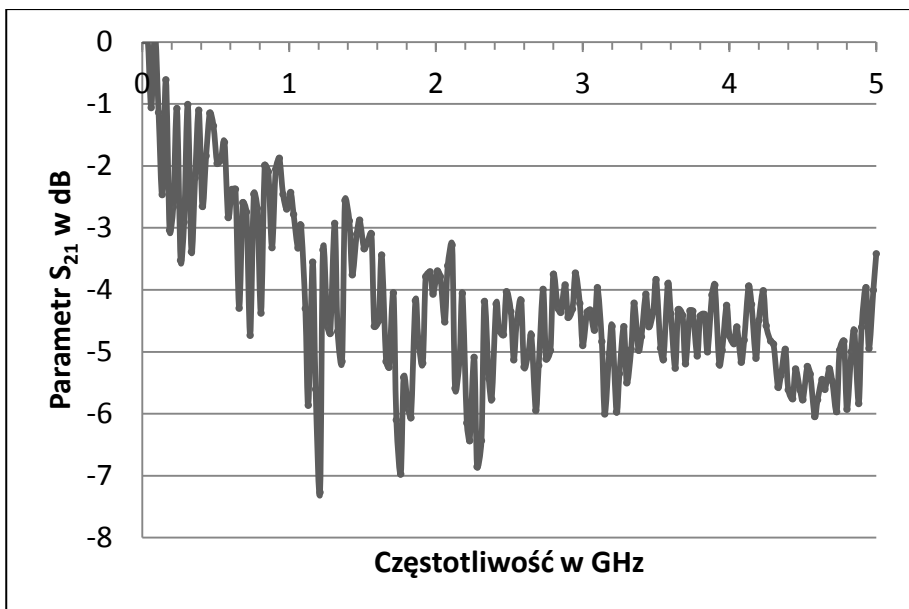
Ryc. 5. Parametr tłumienia S_{21} linii transmisyjnej 2 po pełnym cyklu obciążania
Źródło: opracowanie własne.



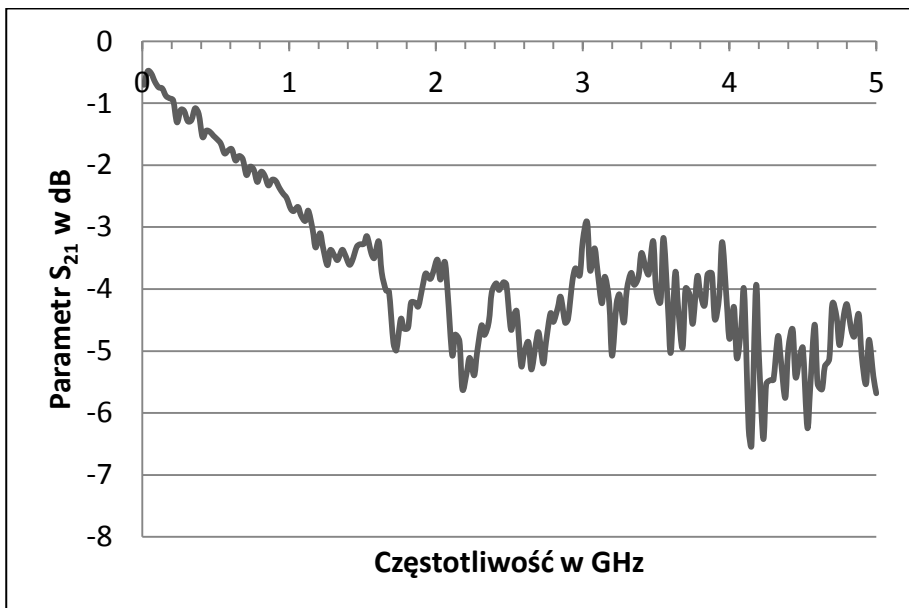
Ryc. 6. Parametr tłumienia S_{21} linii transmisyjnej 2 nieobciążonej
Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 7. Parametr tłumienia S_{21} linii transmisyjnej 2 po pełnym cyklu obciążania.
Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 8. Parametr tłumienia S_{21} linii transmisyjnej 3 nieobciążonej
Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 9. Parametr tłumienia S_{21} linii transmisyjnej 3 po pełnym cyklu obciążania
Źródło: opracowanie własne.

Jak widać na ryc. 4–9, parametr S_{21} , określający tłumienie tekstylnych linii transmisyjnych, posiada tendencję do zmniejszania swojej wartości wraz ze wzrostem częstotliwości przesyłanego sygnału. W sytuacji, gdy nie występują żadne straty sygnału, parametr S_{21} powinien wynosić 0 dB. W idealnym przypadku tłumienie równe 0 dB powinno występować niezależnie od częstotliwości pomiarowej, a więc wykres powinien przyjąć wartość stałą równą zero w całej dziedzinie. Oznacza to, że sygnał na wyjściu linii jest identyczny, jak sygnał podany na jej wejście. O występowaniu tłumienia świadczą tu wartości ujemne. Z wykresów (ryc. 4–9) widać, iż nastąpiły zmiany w charakterystyce tłumienia badanych tekstylnych linii transmisyjnych.

Parametr S_{21} z całej dziedziny częstotliwości (od 10 MHz do 5 GHz) uśredniono, by uzyskać jedną wartość przed rozciąganiem testowanych linii i po rozciąganiu, pomocną w ocenie tłumienia poszczególnych linii. Podano również maksymalne ujemne wartości tego parametru w danych przebiegach częstotliwości. Wyniki przedstawiono w tab. 3.

Tab. 3. Uśrednione parametry S_{21} badanych linii transmisyjnych

Linia	Tłumienie średnie S_{21} w dB		Maksymalna wartość S_{21} w dB	
	Przed rozciąganiem	Po rozciąganiu	Przed rozciąganiem	Po rozciąganiu
1.	-5,74	-6,23	-11,55	-17,41
2.	-3,82	-4,52	-5,90	-9,32
3.	-4,18	-3,75	-7,27	-6,52

Źródło: opracowanie własne.

Oceniając uśrednione w tab. 3 wyniki pomiarów, zauważyć można wzrost tłumienia linii 1, znacznie większy wzrost tłumienia linii 2 oraz, co zastanawiające, zmniejszenie tego parametru dla linii 3, co wskazuje na poprawę właściwości transmisyjnych tej właśnie linii. Podejrzewa się, że różnice w tym obszarze mogą być spowodowane budową materiału podłoża danej linii.

Innym zaobserwowanym efektem jest widoczne przy pomiarach na rozciągnięciu testowanych linii zmniejszenie rozrzutu wartości parametru S_{21} w funkcji częstotliwości, skutkujące zauważalnym wygładzeniem tego parametru na wykresie niezależnie od materiału użytego jako podłoże w wykonanych liniach transmisyjnych. Wygładzenie to jest szczególnie wyraźne

w przypadku linii nr 2 i 3 (ryc. 6–9), gdzie widoczne były przed cyklem obciążania obszary znacznie pogorszonych parametrów przesyłowych. Po pełnym cyklu obciążania obszary te zostały wyeliminowane. Pogorszenie zdolności transmisyjnych po serii obciążeń oceniane na podstawie parametru S_{21} jest wyraźnie widoczne na wszystkich trzech liniach (ryc. 4–9), chociaż wartość uśredniona w przypadku linii 3 wskazuje na poprawę parametru tłumienia.

Dodatkowo, na ryc. 4 i 5 widoczne jest falowanie sygnału w okolicy częstotliwości 4 GHz. Podobne zdarzenie można zauważyć na ryc. 8 i 9 w okolicach częstotliwości 2 GHz. Może być to spowodowane wystąpieniem niepożądanych zjawisk, takich jak interferencje lub rezonans sygnału odbitego od końca linii. Warto w przyszłości bliżej przyjrzeć się temu zjawisku, gdyż pozwoliłoby to jeszcze lepiej zrozumieć charakterystykę tłumienia tekstylnych linii transmisyjnych.

Również maksymalna ujemna wartość parametru tłumienia S_{21} mierzonego dla częstotliwości od 10 MHz do 5 GHz w przypadku dwóch pierwszych linii uległa wyraźnemu zwiększeniu po ich naprężeniu. Ponieważ testowane linie różnią się tylko rodzajem podłoża, wpływ na taki stan rzeczy mogą mieć jego parametry, takie jak większa sztywność i mniejsza rozciągliwość wynikające z użytego surowca, a co za tym idzie przypuszczalnie mniejsze odkształcanie pod wpływem naprężeń. W przypadku linii nr 3 maksymalna ujemna wartość parametru S_{21} po obciążeniu okazała się niższa, co dodatkowo może świadczyć o poprawie właściwości przesyłowych tej linii.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu długotrwałych naprężeń mechanicznych na zdolności przesyłowe tekstylnych linii przesyłowych. Skupiono się na parametrze S_{21} , określającym tłumienie sygnału przy przejściu przez linię transmisyjną. Porównano wyniki dla linii nieobciążanych oraz po poddaniu długotrwałym obciążeniom mechanicznym.

Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że linie transmisyjne poddane opisanym w artykule naprężeniom mechanicznym są zdadne do dalszego użytku w pewnym początkowym zakresie częstotliwości, chociaż ich charakterystyka tłumienia została wyraźnie zmieniona, niezależnie od budowy poszczególnych linii. Wszystkie testowane linie wykazywały zgodny trend parametru S_{21} wraz ze wzrostem częstotliwości pomiarowej, zanim wynik ten osiągał wartość na poziomie -3 dB, świadczącą o pogorszeniu się poziomu sygnału na końcu linii o połowę w stosunku do poziomu sygnału

podanego na jej początek. Przyjmuje się, że jest to graniczny punkt dla możliwości dalszego stosowania linii tekstylnych do przesyłu informacji.

Właściwości transmisyjne, wywnioskowane na podstawie parametru S_{21} , zostały pogorszone dla dwóch z trzech badanych linii, co widać, gdy porówna się poszczególne wykresy. Zaobserwowano również pewnego rodzaju wygładzenie parametru S_{21} . Problemy z jednoznaczną oceną zdolności transmisyjnych linii mogą wynikać z oceny tegoż parametru S_{21} w całej dziedzinie częstotliwości. Wyjściem z tej sytuacji może być zastąpienie zbioru wyników w całym przedziale badanej częstotliwości jedną wartością, będącą maksymalnym lub uśrednionym wynikiem zebranych pomiarów. Otrzymuje się wtedy konkretne wartości, których porównanie może pomóc w ocenie własności transmisyjnych danych linii, informując, jak zmienia się średnie lub maksymalne tłumienie przed obciążaniem linii i po jej obciążeniu.

Zmiana przebiegu charakterystyki parametru S_{21} w dziedzinie częstotliwości po występowaniu długotrwałych naprężeń mechanicznych może mieć związek ze zmianą wymiarów geometrycznych linii, które ulegały rozciągnięciu, jak również ze zmianą sił naprężeń wewnątrz struktury włókienniczej i zmianą wzajemnych sił nacisku ścieżek elektroprzewodzących względem podłoża. Wszystkie te aspekty, choć trudne do zaobserwowania i opisanie, mają bezpośredni wpływ na parametry transmisyjne tekstylnych linii transmisyjnych. Podejrzewa się również, co wymaga dalszych badań, że rodzaj splotu tkaniny, a co za tym idzie liczność osnowy i wątku, może mieć wpływ na geometrię warstwy przewodzącej w tekstylnych liniach transmisyjnych podczas ich naprężania. Geometria elementów przewodzących w badanych liniach może skutkować różnymi wartościami tłumienia sygnału, szczególnie podczas pomiarów zebranych po obciążeniu linii.

THE IMPACT OF THE TENSILE LOAD TO THE ATTENUATION OF SELECTED TEXTILE TRANSMISSION LINES

ABSTRACT

The article is about measurements and analysis of the effect of mechanical stresses during stretching up the textile transmission lines, placed on flat textile products, to their transmission capability. Textile transmission lines, constructed of electrically conductive textile materials placed on textile substrates, are designed for the electrical signals transmission. Studies includes measurements of S_{21} parameter over a wide frequency range up to 5 GHz. This parameter describes the attenuation of electrical signal passed through the test line. This article presents the effect of long-lasting mechanical stress on S_{21} parameter of three sample transmission lines before and after the stretching cycle.

KEYWORDS

transmission lines, signal transmission, signal lines, textronic, mechanical stresses in textiles

BIBLIOGRAFIA

1. Bartkowiak G., *Kierunki rozwoju odzieży inteligentnej*, „Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka”, 2010.
2. Bogdan A., Zwolińska M., *Future Trends In the Development of Thermal Manikins Applied for the Design of Clothing Thermal Insulation*, “FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe” 2012, Vol. 20, No. 4 (93), s. 89–95.
3. Gniolek K., Krucińska I., *The Basic Problems of Textronics*, “FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe” 2004, Vol. 12, No. 1 (45).
4. Gniolek K., Stempień Z., Zięba J., *Tekstronika – nowy obszar wiedzy*, „Przegląd Włókienniczy” 2003, nr 2.
5. Jakubas A., Łada-Tondyra E., Nowak M., Margol M., Lipińska-Opałka A., *Koncepcja tekstronicznego systemu do pomiarów funkcji życiowych małych dzieci*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2015, nr 12 (91), s. 121–124.
6. Leśnikowski J., *Modelowanie tekstylnych linii sygnałowych do zastosowań w tekstronice*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej” 2013, nr 1167, s. 41–58.
7. Leśnikowski J., *New Kind of Textile Transmission Line with an Impedance of 50 Ohms*, “FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe” 2015, Vol. 23, No. 2 (110), s. 51–54.
8. Materiały informacyjne firmy Soliani, [online] <http://www.solianiemc.com/products/shielding-conductive-textile-fabrics/emc-emi-nickel-polyester-fabrics/> [dostęp: 28.12.2016].
9. Owczarek G., Łęzak K., Gralewicz G., *Koncepcja monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych podczas pracy w odzieży strażackiej*, „Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka” 2007, nr 9.
10. Skrzetuska E., *Trendy rozwojowe w tekstronice – Rozwiązania tekstroniczne dla ochrony zdrowia*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2004, nr 4 (90), s. 34–40.
11. Walczak S., *Inteligentne tekstylia – międzynarodowe innowacje w tekstronice*, „Acta Innovations” 2012, nr 3, s. 103–122.
12. *Wilgotność we włókiennictwie*, [online] <http://wskalski.republika.pl/opisy/wilg.htm> [dostęp: 1.01.2017].

PAWEŁ LEŚNIEWICZ

POLITECHNIKA ŁÓDZKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
INSTYTUT MASZYN PRZEMYSŁOWYCH
E-MAIL: PAWEŁ.LESNIEWICZ@DOKT.P.ŁÓDZ.PL

Stanowisko badawcze do wizualizacji przepływu powietrza wokół izolowanego koła samochodowego

STRESZCZENIE

Niniejszy artykuł ma za zadanie przedstawienie stanowiska badawczego zbudowanego w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej w celu analizy oporu aerodynamicznego obracającego się koła samochodowego. Głównym elementem stanowiska jest bieżnia składająca się z beزشwowo łączonego pasa, który został rozciągnięty między dwoma rolkami. Napędzanie pasa oraz sterowanie jego prędkością uzyskano dzięki zastosowaniu silnika elektrycznego wraz z falownikiem. Prędkość jest monitorowana przy użyciu dwóch czujników laserowych. Odpowiednią pozycję testowanego modelu osiągnięto dzięki zastosowaniu ramienia pomiarowego zapewniającego stabilizację koła. Stanowisko zostało umieszczone w tunelu aerodynamicznym oraz zastosowane do badań mających na celu analizę przepływu powietrza wokół obracającego się koła. W tym celu zostało ono wyposażone w zestaw kamer oraz laser służące do wizualizacji przepływu metodą PIV.

SŁOWA KLUCZOWE

wizualizacja przepływu, PIV, aerodynamika

Wstęp

Eksperymentalna analiza charakterystyki przepływu powietrza wokół bryły pojazdu stanowi jeden z dwóch sposobów badań oporu aerodynamicznego generowanego przez poruszający się samochód. Obok prac eksperymentalnych stosuje się również analizy numeryczne, będące pierwszym krokiem w procesie optymalizacji bryły pojazdu. Wyniki symulacji komputerowych wymagają weryfikacji i uzupełnienia podczas prac eksperymentalnych. Dlatego też obecnie większość badań związanych z analizą oporu aero-

dynamicznego pojazdów zawiera część numeryczną i eksperymentalną¹. Przeprowadzenie eksperymentalnej analizy charakterystyki przepływu powietrza wokół bryły pojazdu wymaga zainwestowania ogromnych środków finansowych w budowę tunelu aerodynamicznego oraz stanowiska badawczego. Przykładem mogą być koszty jednego dnia testów w tunelu aerodynamicznym należącym do koncernu PSA, wynoszące około 30 tysięcy euro². Z tego też względu koncerny motoryzacyjne, jak i ośrodki badawcze decydują się na budowę mniejszych tuneli aerodynamicznych, w których możliwe jest przeprowadzanie testów pojazdów w skali lub też pojedynczych elementów. Testy samochodu w skali 1:1 przeprowadza się natomiast na końcowym etapie procesu optymalizacji bryły pojazdu.

Pierwsze wyniki prac eksperymentalnych dotyczących izolowanego koła samochodowego zostały przedstawione w latach siedemdziesiątych XX wieku przez brytyjskich badaczy z London Imperial College³. Od tego czasu kolejne testy związane z analizą charakterystyki przepływu powietrza wokół koła samochodowego były prowadzone zarówno przez ośrodki naukowe⁴, jaki i centra rozwojowe przy współpracy koncernów motoryzacyjnych z uczelniami⁵.

W tunelu aerodynamicznym Instytutu Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej powstało stanowisko badawcze przeznaczone do analizy oporu aerodynamicznego obracającego się koła samochodowego. Ze względu na rozmiar tunelu aerodynamicznego oraz sekcji testowej postanowiono skonstruować stanowisko, na którym będzie możliwe przeprowadzanie testów modeli kół samochodowych w skali 1:3 i 1:4. Dzięki powstaniu stanowiska możliwe będzie porównanie wyników prac eksperymentalnych z wynikami symulacji komputerowych⁶.

¹ Ch. Landstrom, *Passenger Car Wheel Aerodynamics*, Chalmers University of Technology, 2011.

² Materiały koncernu PSA Peugeot Citroën.

³ J. E. Fackrell, *The Aerodynamics of an Isolated Wheel Rotating in Contact with the Ground*, Imperial College London University of London, 1974.

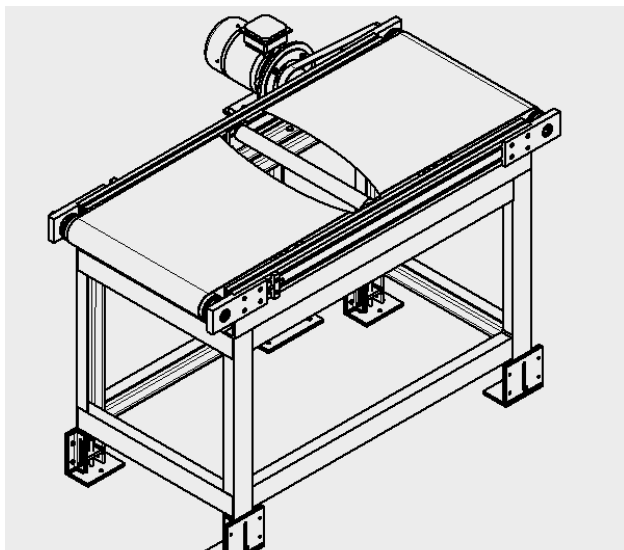
⁴ S. Diasinos, *The Aerodynamic Interaction of a Rotating Wheel and a Downforce Producing Wing in Ground Effect*, University of New South Wales, 2009.

⁵ M. Kulak, M. Karczewski, G. Spolaore, *Flow Around Rotating Wheels and Its Interaction with Vehicle Aerodynamics – CFD vs. Wind Tunnel Tests*, FISITA world congress, F2014-LWS-068.

⁶ P. Leśniewicz, M. Kulak, M. Karczewski, *Aerodynamic Analysis of an Isolated Vehicle Wheel*, "J. of Physics: Conf. Series" 2014, No. 530, 012064.

Główne elementy stanowiska

W celu symulacji obrotu koła zastosowano bezkońcowy pas poliuretanowy, co pozwoliło na wyeliminowanie łączy, które wpływałyby negatywnie na zachowanie się koła podczas testów. Pas został umieszczony na dwóch rolkach, które zapewniają jego napięcie oraz pozwalają na wyśrodkowanie go poprzez regulację naprężenia po obu stronach. W środkowej części pasa umieszczono dodatkową rolę wspierającą pozycjonowanie koła. Powstały system napędzany jest przy pomocy silnika elektrycznego o mocy 1,1 kW, zapewniającego maksymalną prędkość obrotową wynoszącą 3000 obr·min⁻¹, osiąganą w ciągu 15 sekund od rozruchu stanowiska. Prędkość może być regulowana za pomocą trójfazowego falownika o mocy 1,5 kW, a przekazanie napędu odbywa się dzięki zastosowaniu wielorowkowego pasa klinowego. Schematyczny rysunek stanowiska został przedstawiony na ryc. 1. Prędkość pasa podczas testów musi być zsynchronizowana z prędkością powietrza w tunelu. W tym celu zastosowano czujniki laserowe, pozwalające na pomiar zarówno prędkości pasa, jak i koła poprzez zamontowanie punktów pomiarowych na rolce napędzającej oraz na badanym modelu. Powyższy zestaw został umieszczony na stalowej ramie dostosowanej do wymiarów pasa oraz wylotu powietrza w tunelu.

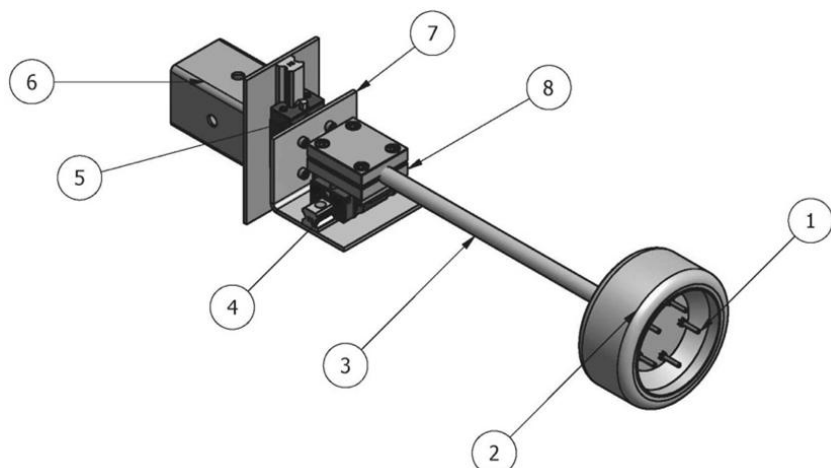


Ryc. 1. Schematyczny rysunek stanowiska

Źródło: J. Kopka, *Design of an Experimental Stand for Tests of Tire Aerodynamics*, Politechnika Łódzka, 2014.

Ramię pomiarowe

Stabilizacja modelu podczas przeprowadzania testów oraz poprawne jego umieszczenie na stanowisku są kluczowe dla przeprowadzanych badań. Model koła został umieszczony na ramieniu pomiarowym, którego głównymi elementami są liniowy układ jezdy osi oraz piasta wraz z łożyskami. Szczegółowa budowa ramienia została przedstawiona na ryc. 2.

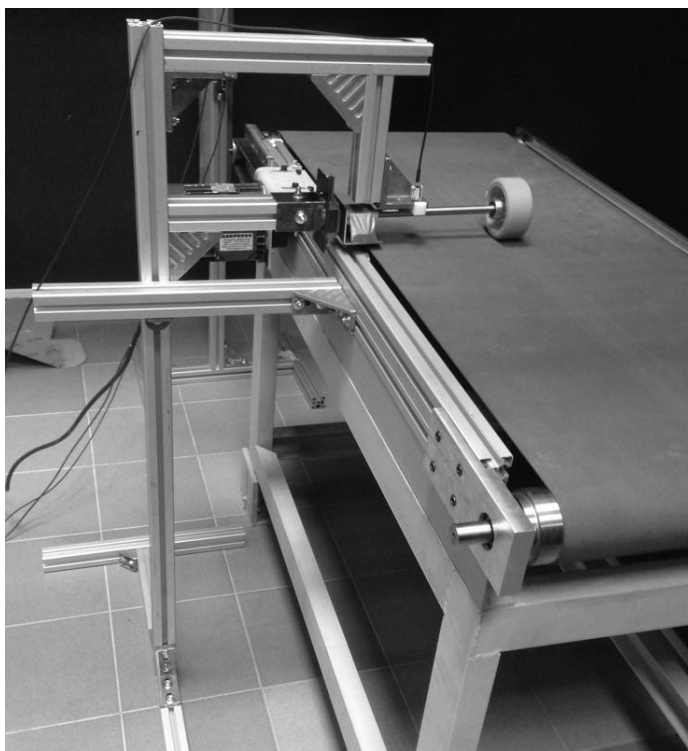


Ryc. 2. Ramię pomiarowe

Źródło: P. Pietrzak, *Construction of the Measuring Arm for the Experimental Stand in a Wind Tunnel Facility*, Politechnika Łódzka, 2016.

Głównymi elementami ramienia pomiarowego są: 1 – mocowanie koła, 2 – testowany model, 3 – oś, 4, 5 – liniowy układ jezdy, 6 – łącznik do profilu aluminiowego, 7 – płyta podporowa, 8 – mocowanie osi. W zastosowanym rozwiązaniu jedynymi ruchomymi elementami podczas testów są piasta z łożyskami oraz koło. Pozostała część ramienia jest nieruchoma, co zapewnia odpowiednią pozycję koła na pasie. Zdecydowano się na takie rozwiązanie konstrukcyjne ze względu na kilka zalet odgrywających ważną rolę podczas tworzenia stanowiska, jak również w czasie jego późniejszej eksploatacji. Zastosowane rozwiązanie sprawia, że łożyska poddawane są mniejszym obciążeniom, gdyż główne siły oddziałują na piastę. Relatywnie prosta konstrukcja ramienia pozwoliła na wykonanie wielu elementów w warsztacie znajdującym się w Instytucie, co miało znaczący wpływ na zmniejszenie kosztów oraz skrócenie czasu wykonania. Sposób mocowania koła do piasty bazujący na pięciu śrubach jest atutem zwłaszcza podczas testów po-

równawczych, gdy modele kół są często zmieniane. Dla zapewnienia sztywności całej konstrukcji ramię pomiarowe przymocowane jest do ramy stanowiska za pomocą profili aluminiowych. Ramię pomiarowe zostało przedstawione na ryc. 3 wraz z całym stanowiskiem badawczym.



Rys. 3. Ramię pomiarowe umieszczone na stanowisku badawczym

Źródło: materiały własne.

Wizualizacja przepływu

Podczas badań z zastosowaniem opisanego stanowiska wizualizacja przepływu powietrza wokół modelu izolowanego koła była przeprowadzana dzięki zastosowaniu metody PIV (Particle Image Velocimetry), bazującej na wizualizacji przepływu powietrza poprzez pomiar prędkości przepływu medium wraz z cząsteczkami znacznika (posiewu). Pomiar ten dokonywany jest na podstawie dwóch zdjęć cząsteczek posiewu wykonanych w bardzo krótkim odstępie czasu. Na podstawie różnicy w położeniu cząsteczek mię-

dzy zdjęciami możliwe jest obliczenie ich prędkości⁷. Podczas jednego pomiaru wykonuje się około 100 zdjęć, co pozwala na uśrednienie pola prędkości i wizualizację obszarów niskiej i wysokiej prędkości. W Instytucie Maszyn Przepływowych stosuje się do badań PIV sprzęt firmy LaVision, który umożliwia równoczesne zastosowanie dwóch kamer umieszczonych pod różnymi kątami. Pozwala to na uzyskanie dokładnej informacji o parametrach pola przepływu. Podczas badań używa się cząsteczek specjalnie przygotowanego oleju dostarczanego do przepływu w tunelu aerodynamicznym. Cząsteczki te poruszają się z taką samą prędkością jak powietrze. W celu odpowiedniego oświetlenia cząstek stosuje się specjalny laser o długości fali 532 nm, pozwalający na odfiltrowanie poruszających się cząsteczek od tła. Stanowisko badawcze wraz z elementami zestawu PIV zostało przedstawione na ryc. 4.

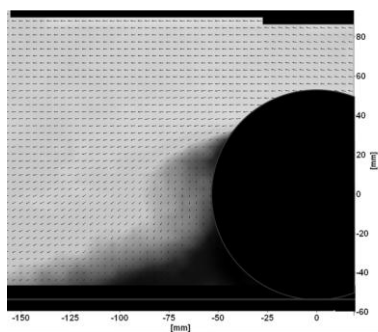


Ryc. 4. Stanowisko badawcze do wizualizacji przepływu powietrza wokół izolowanego koła samochodowego

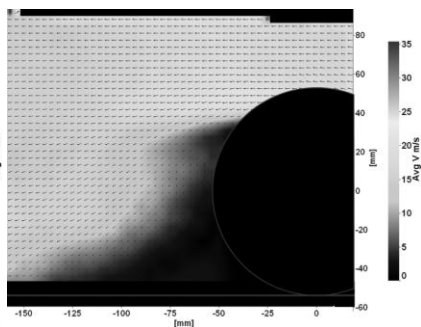
Źródło: materiały własne.

⁷ K. Olasek, M. Karczewski, *Multi-phase Modernisation of the Subsonic Wind Tunnel Oriented Towards Integration of cfd & Experiment*, XX Fluid Mechanics Conference, 2012.

Na ryc. 5 i 6 przedstawiono wyniki wstępnych badań, zawierające wizualizację przepływu powietrza wokół izolowanego koła samochodowego. Ryc. 5 przedstawia rozkład pól przepływu za kołem w płaszczyźnie równoległej do prędkości i w połowie szerokości koła dla geometrii typu *slick* (brak bieżnika), natomiast ryc. 6 – rozkład pól przepływu za kołem w płaszczyźnie równoległej do prędkości i w połowie szerokości koła dla geometrii typu *grooves* (bieżnik w postaci 3 wzdłużnych rowków). Pas napędowy poruszał się ze strony prawej do lewej, podobnie jak napływ powietrza. Koło zaś obracało się zgodnie z ruchem wskazówek zegara.



Ryc. 5. Rozkład pól prędkości,
opona *slick*
Źródło: materiały własne.



Ryc. 6. Rozkład pól prędkości,
opona *grooves*
Źródło: materiały własne.

Przedstawione powyżej wyniki stanowią wstępny etap prac, mających na celu analizę wpływu bieżnika na opór aerodynamiczny izolowanego koła samochodowego. Już na ryc. 5 i 6 można dostrzec różnice wynikające z zastosowanego typu bieżnika (*slick* vs. *grooves*). Wyniki uzyskane w ramach badań eksperymentalnych zostaną zweryfikowane z symulacjami komputerowymi wykonanymi z zastosowaniem numerycznej mechaniki płynów i będą przedstawione w kolejnych publikacjach.

Podsumowanie

Przedstawiony artykuł zawiera opis najważniejszych elementów stanowiska badawczego, jakie powstało dzięki realizacji grantów wewnętrznych Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej (I10/501/2/9124, 501-11-10-1/9116). Zaprezentowane stanowisko badawcze zostało wykorzystane podczas badań wpływu bieżnika na opór aerodynamiczny generowany przez izolowane koło samochodowe oraz podczas badań dotyczących analizy geometrii obręczy koła samochodowego.

TEST STAND TO VISUALIZE THE AIR FLOW AROUND THE ISOLATED VEHICLE WHEEL

ABSTRACT

The following article presents a test stand built at the Institute of Turbomachinery of Lodz University of Technology to analyse the aerodynamic resistance of a rotating vehicle wheel. The main component of the stand is an aluminium frame together with polyurethane belt that has been stretched between two rollers. The belt drive and speed control were obtained by using an electric motor with an inverter. Velocity is continuously monitored using two laser sensors. The correct position of the tested model is achieved by using a measuring arm to stabilize the wheel. Test stand was placed in the aerodynamic tunnel and used for research related to the research of the air flow around the rotating wheel. For this purpose, stand was equipped with a set of cameras and a laser for PIV visualization.

KEYWORDS

flow visualisation, PIV, aerodynamics

BIBLIOGRAFIA

1. Diasinos S., *The Aerodynamic Interaction of a Rotating Wheel and a Downforce Producing Wing in Ground Effect*, University of New South Wales, 2009.
2. Fackrell J. E., *The Aerodynamics of an Isolated Wheel Rotating in Contact with the Ground*, Imperial College London University of London, 1974.
3. Kopka J., *Design of an Experimental Stand for Tests of Tire Aerodynamics*, Politechnika Łódzka, 2014.
4. Kulak M., Karczewski M., Spolaore G., *Flow Around Rotating Wheels and Its Interaction with Vehicle Aerodynamics – CFD vs. Wind Tunnel Tests*, FISITA world congress, F2014-LWS-068.
5. Landstrom Ch., *Passenger Car Wheel Aerodynamics*, Chalmers University of Technology, 2011.
6. Leśniewicz P., Kulak M., Karczewski M., *Aerodynamic Analysis of an Isolated Vehicle Wheel*, "J. of Physics: Conf. Series" 2014, No. 530, 012064.
7. Materiały koncernu PSA Peugeot Citroën.
8. Olasek K., Karczewski M., *Multi-phase Modernisation of the Subsonic Wind Tunnel Oriented Towards Integration of cfd & Experiment*, XX Fluid Mechanics Conference, 2012.
9. Pietrzak P., *Construction of the Measuring Arm for the Experimental Stand in a Wind Tunnel Facility*, Politechnika Łódzka, 2016.

ANNA ŁASKA-LEŚNIEWICZ

POLITECHNIKA ŁÓDZKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
INSTYTUT INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ
E-MAIL: ANNA.LASKA@DOKT.P.LODZ.PL

Wykorzystanie metod szybkiego prototypowania (*rapid prototyping*) w nowoczesnej medycynie

STRESZCZENIE

Metody szybkiego prototypowania wykorzystuje się w wielu dziedzinach. Od kilku lat zauważa się zainteresowanie tymi technologiami również w medycynie, protetyce i inżynierii tkankowej oraz biomedycznej. Tak szerokie zastosowanie metod szybkiego prototypowania związane jest ze względnie niską ceną wytworzenia rzeczywistego modelu 3D oraz szybkością procesu. W medycynie rekonstrukcyjnej i implantacyjnej ceni się je głównie za możliwość dostosowania do indywidualnych potrzeb pacjenta. Do powszechnie stosowanych metod zalicza się stereolitografię, laserowe spiekanie proszków, osadzanie stopionego materiału i druk 3D.

Artykuł zawiera przegląd metod szybkiego prototypowania w odniesieniu do zastosowań w nowoczesnej medycynie, implantologii i inżynierii tkankowej, której produkty (rusztowania tkankowe) umożliwiają regenerację uszkodzonej tkanki pacjenta lub całego narządu. Dodatkowo przedstawiono grupy materiałów, ze szczególnym uwzględnieniem polimerów i biomateriałów polimerowych, które stosuje się z sukcesem w wyżej wymienionych aplikacjach.

SŁOWA KLUCZOWE

Szybkie prototypowanie, druk 3D, metoda FDM, polimery biodegradowalne

Wprowadzenie

Obecnie medycyna potrzebuje nowoczesnych rozwiązań, które pozwolą odpowiedzieć na rosnące wymagania pacjentów wysoko i średnio rozwiniętych krajów. Dotychczasowe metody leczenia są stale ulepszane dzięki postępowi odnotowywanemu nie tylko w zakresie medycyny, ale także technologii i techniki. W ostatnich latach zastosowanie szybkiego prototypowa-

nia, a w szczególności druku 3D, zyskało na popularności i stało się alternatywą w procesie tworzenia prototypów. Szybkość i niewielkie koszty spowodowały zainteresowanie tymi metodami nie tylko we wzornictwie przemysłowym, projektowaniu (designie), motoryzacji czy przemyśle, ale także w medycynie, inżynierii biomedycznej i tkankowej.

Szybkie prototypowanie (*rapid prototyping*, RP), znane również pod pojęciem SFF (*solid free-form fabrication*), to grupa technologii przyrostowej wytwarzania AM (*additive manufacturing*) opierająca się na tworzeniu fizycznego obiektu trójwymiarowego metodą warstwa po warstwie¹. Do technik szybkiego prototypowania zalicza się przede wszystkim stereolitografię SLA (*stereolithography*), spiekanie proszków SLS (*selective laser sintering*), osadzanie stopionego materiału FDM (*fused deposition modelling*) i druk 3D (*3D printing*).

Zastosowań metod RP w medycynie i naukach z nią powiązanych jest coraz więcej. Powszechnie stosuje się już druk 3D do tworzenia modeli dla potrzeb chirurgii rekonstrukcyjnej i implantologii (ryc. 1). Wytwarzanie rusztowań do zasiedlenia komórkami pacjenta i regeneracji danej tkanki (na przykład kostnej, chrzęstnej) to jeden z aktualnych trendów łączących zmagania inżynierii materiałowej i tkankowej. Co więcej, na podstawie danych z tomografii komputerowej drukuje się modele anatomiczne, co pozwala lekarzom przygotować się do skomplikowanych operacji.



Ryc. 1. Model żuchwy wykonany z ABS

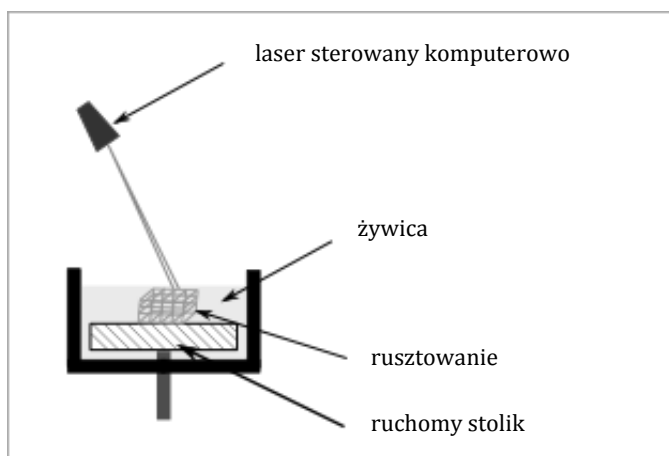
Źródło: materiały własne.

¹ I. Zein, *Fused Deposition Modelling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications*, "Biomaterials" 2002, No. 23, s. 1169–1185.

Metody szybkiego prototypowania

STEREOLITOGRAFIA

Stereolitografia (SLA) jest jedną z pierwszych metod szybkiego prototypowania, a jej początki sięgają połowy lat osiemdziesiątych XX wieku². Firma 3D Systems opracowała tę metodę i skomercjalizowała jako pierwszą spośród technik RP.



Ryc. 2. Schemat urządzenia do wytwarzania rusztowań komórkowych metodą SLA

Źródło: opracowanie własne.

Stereolitografia polega na wytwarzaniu warstwy po warstwie obiektu 3D na podstawie komputerowego modelu stworzonego za pomocą specjalnego programu lub na podstawie danych zebranych z tomografii komputerowej (CT) lub rezonansu magnetycznego (MRI)³. Tworzenie rusztowania trójwymiarowego opiera się na przestrzennie kontrolowanym utwardzaniu płynnej żywicy w procesie fotopolimeryzacji. Stosowane są dwa typy urządzeń stereolitograficznych, które różnią się między sobą metodą naświetlania i budową. Na ryc. 2 zaprezentowano urządzenie typu *bottom-up* ze skanującym laserem, drugi typ wykorzystuje cyfrowy projektor świetlny (*digi-*

² F. P. Melchels et al., *A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering*, "Biomaterials" 2010, No. 31, s. 6121–6130.

³ J. W. Lee et al., *3D Scaffold Fabrication with PPF/DEF Using Micro-stereolithography*, "Microelectronic Engineering" 2007, No. 84, s. 1702–1705.

tal light projector) i sterowaną komputerowo platformę roboczą⁴. W obu metodach wzór jest wyświetlany na powierzchni żywicy, co prowadzi do jego zestalenia i uzyskania warstwy przylegającej do platformy roboczej. Struktura o pożądanej geometrii i wysokości zostaje ponownie pokryta płynną żywicą, tak by wytworzyć kolejną warstwę rusztowania.

Wśród zalet stereolitografii należy wymienić wysoką rozdzielczość szczegółów i dokładność wymiarową ($20\ \mu\text{m}$)⁵. SLA pozwala wytworzyć struktury o bardziej skomplikowanej geometrii niż FDM i SLS. Najmniejsze obiekty mają $50\text{--}200\ \mu\text{m}$.

LASEROWE SPIEKANIE PROSZKÓW

Spiekanie proszków metodą SLS (*selective laser sintering*) jest techniką stosującą wiązkę lasera do spiekania cząstek proszku w celu stworzenia trójwymiarowego modelu⁶. Obiekt tworzony jest warstwa po warstwie przez powtarzanie procesu nanoszenia cienkiej warstwy proszku i jego spiekania. Metoda SLS może być stosowana z wykorzystaniem polimerów, metali, ceramiki i proszków kompozytowych.

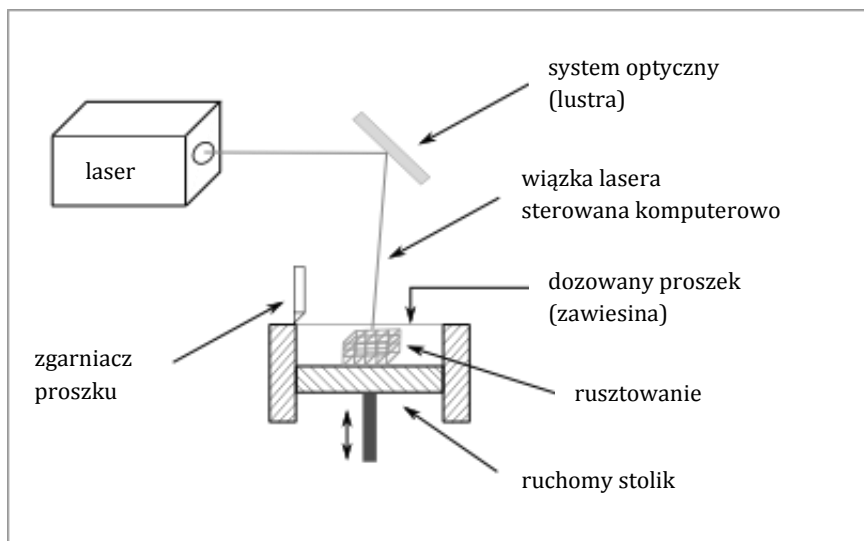
Proces selektywnego spiekania laserowego przeprowadza się przy użyciu promieniowania laserowego z zakresu podczerwieni (długość fali od $780\ \text{nm}$ do $1\ \text{mm}$). Źródłem promieniowania jest laser CO₂ lub Nd:YAG. Pierwszym etapem procesu jest rozprowadzenie cienkiej warstwy proszku na stole o regulowanym położeniu w kierunku osi Z. Następnie proszek poddaje się działaniu wiązki laserowej, której położenie jest ściśle określone przy pomocy oprogramowania komputerowego. Sterując parametrami wiązki laserowej, zmienia się proces wytwarzania obiektu. Po spieczeniu proszku w wybranych obszarach stolik jest opuszczany o zadaną wysokość warstwy. Rozprowadzana jest kolejna warstwa proszku i następuje proces jej spiekania. Procedura powtarza się do momentu otrzymania całego modelu.

⁴ F. P. Melchels et al., op. cit.

⁵ S. Dzionk, *Modelowanie powierzchni elementów wykonywanych metodą stereolitografii*, „Inżynieria Maszyn” 2013, No. 18, s. 7–19.

⁶ J. Kundu et al., *Biomaterials for Biofabrication of 3D Tissue Scaffolds*, [w:] *Biofabrication. Micro- and Nano-fabrication, Printing, Patterning and Assemblies*, William Andrew, USA 2013; L. Fwu-Hsing, *Selective Laser Sintering of a Hydroxyapatite-silica Scaffold on Cultured MG63 Osteoblasts in Vitro*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing” 2012, No. 13, s. 439–444; F. E. Wiria et al., *Improved Biocomposite Development of Poly(Vinyl Alcohol) and Hydroxyapatite for Tissue Engineering Scaffold Fabrication Using Selective Laser Sintering*, „Journal of Materials Science. Materials in Medicine” 2008, No 19, s. 989–996.

Schemat urządzenia do selektywnego spiekania proszków został przedstawiony na ryc. 3. Jego podstawowe elementy to: laser (CO₂ lub Nd:YAG), system optyczny (lustra), ruchomy stolik, zgarniacz proszku i system dostarczający proszek do układu.



Ryc. 3. Schemat urządzenia do selektywnego spiekania laserowego

Źródło: opracowanie własne.

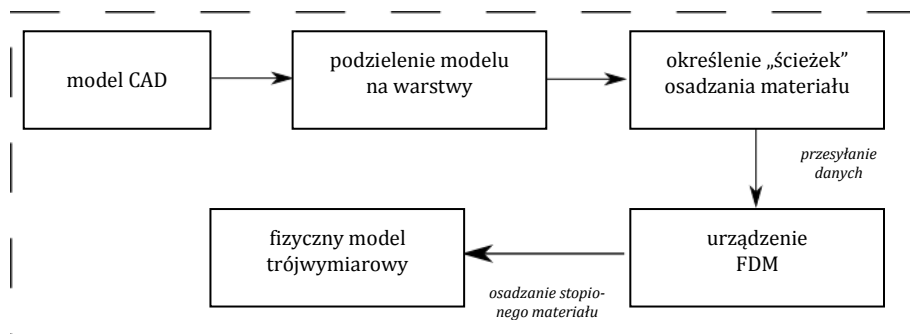
OSADZANIE STOPIONEGO MATERIAŁU

Osadzanie stopionego materiału (FDM) jest powszechnie stosowaną technologią prototypowania, zapewniającą szybkie i łatwe wytwarzanie skafoldów⁷. W tej metodzie obiekt trójwymiarowy jest tworzony na podstawie modelu komputerowego. Rzeczywiste obiekty są skanowane przy pomocy tomografu komputerowego lub rezonansu magnetycznego lub modele są bezpośrednio tworzone w odpowiednich programach komputerowych.

Głównym elementem urządzenia do osadzania stopionego materiału jest wylączarka wyciskająca termoplastyczny wsad, który najpierw zostaje podgrzany do odpowiedniej temperatury w celu jego stopnienia. Następnie stopiony materiał, polimer lub kompozyt polimer-ceramika osadzany jest na stoliku warstwa po warstwie. Technika ta umożliwia kontrolę wewnętrznej

⁷ I. Zein, op. cit.

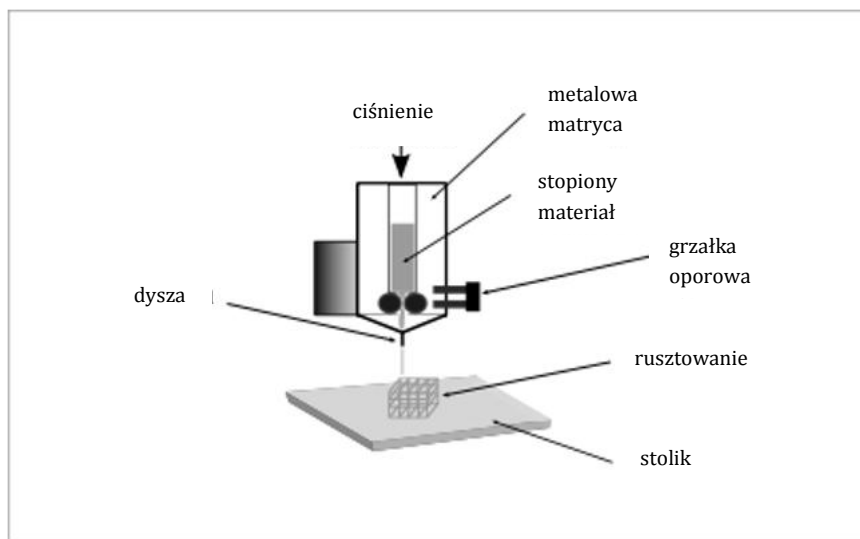
struktury rusztowania pod tkanki, to znaczy jego porowatości, wielkości włókien i porów oraz ich ułożenia. Ryc. 4 przedstawia uproszczoną ścieżkę powstawania rzeczywistego modelu z modelu CAD.



Rys. 4. Schemat procesu osadzania stopionego materiału

Źródło: opracowanie własne.

Poniżej zaprezentowano schematyczny model urządzenia wykorzystującego tę technikę szybkiego prototypowania (ryc. 5).



Rys. 5. Wyciskanie i osadzanie materiału w procesie FDM

Źródło: opracowanie własne.

Na końcowy produkt, gotowy do zasiedlenia przez komórki, mają wpływ następujące parametry procesu:

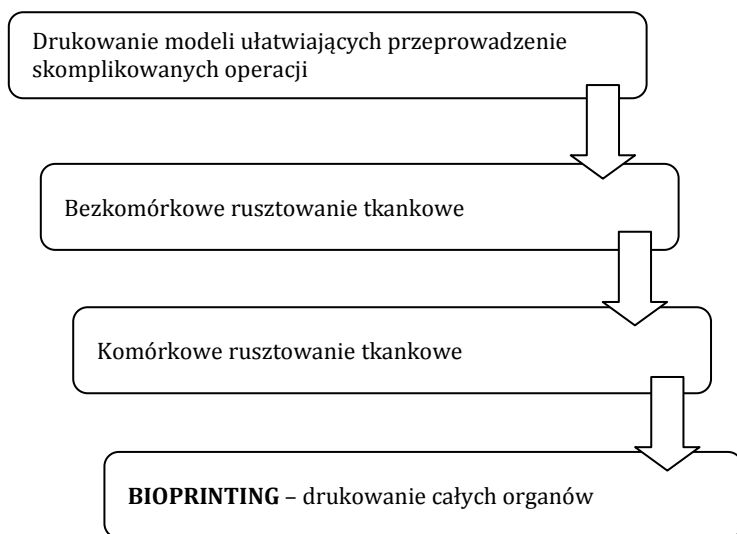
- prędkość przemieszczania się głowicy,
- szybkość podawania stopionego materiału,
- średnica dyszy,
- temperatura procesu (temperatura topnienia materiału wsadowego).

DRUK 3D

Trójwymiarowe drukowanie wykorzystuje koncept drukowania atramentowego, w którym materiał (tusze) jest wypuszczany przez głowicę⁸. Głowica porusza się nad powierzchnią materiału w postaci proszku na podstawie informacji o przekrojach poprzecznych szkieletu określonych przez operatora procesu. Jednocześnie głowica wypuszcza lepiskie łączące cząsteczki proszku, co przypomina proces spiekania laserowego. Następnym etapem jest obniżenie się platformy z wytworzoną warstwą, ponowne rozprowadzenie proszku i łączenie go. Tak powstają kolejne warstwy drukowanego obiektu.

Trójwymiarowe drukowanie znajduje potencjalnie szerokie zastosowanie w medycynie, na przykład modele narządów do przedoperacyjnych przygotowań, drukowanie skóry, naczyń krwionośnych, części zamiennych serca, protez gałki ocznej, nosa, stworzenie ażurowego gipsu oraz szereg aplikacji w ortodoncji. W inżynierii tkankowej można zauważyć rozwój w kierunku drukowania całych gotowych organów (ryc. 6).

⁸ J. Inzana et al., *3D Printing of Composite Calcium Phosphate and Collagen Scaffolds for Bone Regeneration*, "Biomaterials" 2014, No. 35, s. 4026–4034; S. Maleksaedy et al., *Toward 3D Printed Bioactive Titanium Scaffolds with Bimodal Pore Size Distribution for Bone Ingrowth*, "Procedia CIRP" 2013, No. 5, s. 158–163.



Ryc. 6. Kierunek rozwoju drukowania 3D w medycynie
Źródło: opracowanie własne.

Materiały stosowane w metodach szybkiego prototypowania

W metodach szybkiego prototypowania wykorzystuje się bardzo szeroką gamę materiałów. Ich dobór jest ściśle związany z aplikacją wytworzonego modelu/prototypu. W przypadku tworzenia poglądowego modelu do wizualizacji i planowania zabiegu można wykorzystać stosunkowo tanie materiały, na przykład polimery ABS czy PLA o czystości technicznej. Do wytwarzania zindywidualizowanych elementów implantowanych w organizm pacjenta potrzebne są biomateriały, które będą spełniać szereg wymogów – przede wszystkim muszą być biozgodne, biokompatybilne oraz nie mogą wywoływać reakcji alergicznych i toksycznych. Z dużym powodzeniem wykorzystuje się polimery biodegradowalne, takie jak polilaktyd (PLA), poliglikolid (PGA), kopolimer polilaktyd-glikolid (PLGA), polikaprolakton (PCL), oraz polimery naturalne, jak chityna, chitozan i kolagen, czy polimery z grupy siloksanów, na przykład polidimetylosiloksan (PDMS). W tab. 1 zostały przedstawione poszczególne grupy materiałów i możliwości ich zastosowania w omawianych technikach szybkiego prototypowania.

Tab. 1. Podsumowanie technik szybkiego prototypowania i stosowanych materiałów

	Metody szybkiego prototypowania			
	SLA	SLS	FDM	3DP
reguła tworzenia materiału	fotopolimeryzacja	spiekanie proszków	wyciskanie stopionego materiału	proszek + osadzanie spoiwa
polimery	+	+	+	+
hydrożele	+	-	+	+
ceramika	+	+	+	+
metale	-	+	+	+
kompozyty	+	+	+	+
komórki	+	-	+	+

Źródło: F. P. Melchels et al., *A Review on Stereolithography and Its Applications in Bio-medical Engineering*, "Biomaterials" 2010, No. 31.

Podsumowanie

Metody szybkiego prototypowania cechują się wytwarzaniem modelu trójwymiarowego warstwa po warstwie, formatem .STL oraz możliwością wykorzystania różnych materiałów w procesie wytwarzania. Szybkie prototypowanie znalazło szereg zastosowań w motoryzacji, przemyśle, wzornictwie przemysłowym, projektowaniu czy architekturze. Również w medycynie i inżynierii biomedycznej coraz chętniej wykorzystuje się te technologie. Przypuszcza się, że rozwój metod szybkiego prototypowania, a szczególnie druku 3D i biodruku, przyczyni się do odnalezienia skutecznych sposobów leczenia wielu schorzeń i chorób.

RAPID PROTOTYPING METHODS IN MODERN MEDICINE

ABSTRACT

Rapid prototyping methods are used in many branches. For several years those technologies has been receiving a great deal of attention in medicine, prosthetics, tissue engineering and biomedical engineering. Low cost and lead time of 3D model production may explain such wide application. In regenerative medicine and implantology it is recognized by their possibility of product personalization to patient's needs. The most commonly used methods are stereolithography, selective laser sintering (SLS), fused deposition modelling (FDM), and 3D printing.

The article contains the overview of rapid prototyping methods that are used in modern medicine, implantology and tissue engineering. Products of tissue engineering – scaffolds enable patient's tissue regeneration or even whole patient's organ. Moreover, biomaterials used in mentioned application are presented, especially biodegradable polymers.

KEYWORDS

Rapid prototyping, 3D printing, FDM, biodegradable polymers

BIBLIOGRAFIA

1. Dzionk S., *Modelowanie powierzchni elementów wykonywanych metodą stereolitografii*, „Inżynieria Maszyn” 2013, No. 18, s. 7–19.
2. Fwu-Hsing L., *Selective Laser Sintering of a Hydroxyapatite-silica Scaffold on Cultured MG63 Osteoblasts in Vitro*, “International Journal of Precision Engineering and Manufacturing” 2012, No. 13, s. 439–444.
3. Inzana J. et al., *3D Printing of Composite Calcium Phosphate and Collagen Scaffolds for Bone Regeneration*, “Biomaterials” 2014, No. 35, s. 4026–4034.
4. Kundu J. et al., *Biomaterials for Biofabrication of 3D Tissue Scaffolds*, [w:] *Biofabrication. Micro- and Nano-fabrication, Printing, Patterning and Assemblies*, William Andrew, USA 2013.
5. Lee J. W. et al., *3D Scaffold Fabrication with PPF/DEF Using Micro-stereolithography*, “Microelectronic Engineering” 2007, No. 84, s. 1702–1705.
6. Maleksaeddy S. et al., *Toward 3D Printed Bioactive Titanium Scaffolds with Bimodal Pore Size Distribution for Bone Ingrowth*, “Procedia CIRP” 2013, No. 5, s. 158–163.
7. Melchels F. P. et al., *A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering*, “Biomaterials” 2010, No. 31, s. 6121–6130.
8. Wiria F. E. et al., *Improved Biocomposite Development of Poly(Vinyl Alcohol) and Hydroxyapatite for Tissue Engineering Scaffold Fabrication Using Selective Laser Sintering*, “Journal of Materials Science. Materials in Medicine” 2008, No 19, s. 989–996.
9. Zein I., *Fused Deposition Modelling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications*, “Biomaterials” 2002, No. 23, s. 1169–1185.

Informacje o autorach

Paweł Kubiak – mgr inż., absolwent Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej, doktorant w Zakładzie Odzieżownictwa i Tekstroniki w Instytucie Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej. Zainteresowania naukowe: zagadnienia związane z tekstroniką, innowacyjnym włókiennictwem oraz zastosowaniem elektroniki w tekstyliach. Przygotowuje pracę doktorską na temat tekstylnych linii sygnałowych.

Anna Laska-Leśniewicz – doktorantka Inżynierii Materiałowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. Jej zainteresowania naukowe to przed wszystkim biomateriały, inżynieria tkankowa i biomedyczna. W swojej pracy badawczej zajmowała się resorbowalnymi rusztowaniami tkanekowymi, zużyciem panewki stawu biodrowego wykonanego z polietylenu oraz cementami kostnymi na bazie polimetakrylanu metylu.

Paweł Leśniewicz – doktorant Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej. Zajmuje się badaniami dotyczącymi optymalizacji geometrii obręczy koła samochodowego w celu zredukowania oporów powietrza poruszającego się samochodu osobowego. W zakresie prac uwzględniane są: wpływ geometrii bieżnika oraz kształt obręczy samochodowej. Badania zawierają zarówno prace eksperymentalne wykonywane w tunelu aerodynamicznym IMP PŁ, jak i numeryczną analizę wybranych przypadków. Wybrane publikacje: P. Leśniewicz, M. Kulak, M. Karczewski, *Vehicle Wheel Drag Coefficient in Relation to Travelling Velocity – CFD Analysis*, "J. of Physics: Conf. Series" 2016, No. 760, 012014; P. Leśniewicz, M. Kulak, M. Karczewski, *Aerodynamic Analysis of an Isolated Vehicle Wheel*, "J. of Physics: Conf. Series" 2014, No. 530, 012064. Laureat konkursu „Ekologiczny magister i doktor” organizowanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Łodzi (2014).

Jacek Leśnikowski – dr hab. inż., absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Łódzkiej. Adiunkt na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej. Stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie włókiennictwa uzyskał w 2003 roku, stopień doktora habilitowanego w 2014 roku. Obecnie zajmuje się pomiarami wielkości

nielektrycznych metodami elektrycznymi, instrumentacją pomiarów, projektowaniem i budową aparatury pomiarowej, zastosowaniami elektroniki w tekstronice oraz tekstylnymi liniami sygnałowymi.

Agnieszka M. Proszewska – doktorantka oraz nauczyciel akademicki w Instytucie Filozofii oraz na Wydziale Filologicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego, magistrantka informatyki stosowanej na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ. Zainteresowania naukowe: filozofia nauk przyrodniczych, metody reprezentacji strukturalnej, logika matematyczna, teorie obliczeń i złożoności. Od 2014 roku członek Polskiego Towarzystwa Sztucznej Inteligencji oraz European Philosophy of Science Association.

Adrian Stencel – doktorant oraz nauczyciel akademicki w Instytucie Filozofii Uniwersytetu Jagiellońskiego. Prowadzi zajęcia z metodologii nauk przyrodniczych. Jest absolwentem Wydziału Biologii i Nauk o Ziemi UJ. Zainteresowania naukowe: konceptualne problemy wokół teorii ewolucji, biologii populacyjnej oraz mikrobiologii, wpływ odkryć z zakresu mikrobiomiki (m.in. badania nad symbiotycznymi mikroorganizmami) na rozumienie podstawowych pojęć.